



**Luis André Martinez
Vieira**

**Balanço energético da operação de uma caldeira a
biomassa**



**Luis André Martinez
Vieira**

**Balanço energético da operação de uma caldeira a
biomassa**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação do Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Arguente

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Este trabalho é o marco do final, de uma das mais importantes fases da minha vida. Como tal, não poderia deixar de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Luís Tarelho, e meu coorientador, Professor Miguel Oliveira, pela orientação, disponibilidade, apoio, conselhos e estima ao longo da realização deste trabalho.

À empresa *Ventil* – Engenharia do Ambiente, Lda, onde foi realizado o estágio, em particular ao Eng. José Almeida, pela constante disponibilidade, ajuda e boa disposição.

Ao meu colega de curso André Santiago pela disponibilidade e ajuda prestada.

A todos os meus amigos, de longa data, e aos que fiz durante o meu percurso académico, agradeço a amizade, o apoio e os momentos de boa disposição e companheirismo, os quais nunca vou esquecer.

À minha namorada que nunca deixou de me apoiar, de se dedicar, de mostrar carinho em qualquer momento menos bom. Sem ti teria sido muito mais difícil. Também a toda a sua família e amigos que me acolheram bem e me deram apoio nesta caminhada.

Por fim, aos meus pais, irmãos, e toda a minha restante família, por terem acreditado sempre em mim, por todo o amor, carinho e disponibilidade. Sem vocês não teria conseguido chegar aqui.

A todos, o mais sincero obrigado.

palavras-chave

biomassa, caldeira, balanço energético, motores de indução, energia elétrica eficiência energética.

resumo

A pressão causada sobre os recursos energéticos é impulsionada pela evolução demográfica e pelo crescimento económico, que se vem registando principalmente nos países em desenvolvimento. Segundo várias estatísticas, a procura pela energia incide principalmente sobre os combustíveis fósseis, os quais, representam cerca de 86,7% do *mix* de consumo mundial de energia primária.

A incerteza sobre as reservas das fontes energéticas não renováveis, e os problemas ambientais derivados da sua conversão noutros tipos de energia, levaram a uma implementação de medidas com rumo à sustentabilidade e eficiência energética. Desta forma, o aumento da utilização sobre as fontes energéticas renováveis é de extrema importância. A biomassa é uma das fontes energéticas de maior relevo.

A utilização de biomassa em caldeiras, oferece benefícios económicos, sociais e ambientais, tais como poupança financeira no combustível, conservação dos recursos fósseis e redução de emissões poluentes.

As caldeiras desenvolvidas por empresas como a *Ventil*, são uma solução para a produção de energia térmica pela combustão da biomassa. Estes sistemas caracterizam-se por serem energeticamente eficientes nas várias componentes da sua operação.

Assim, pretende-se fazer uma caracterização dos consumos energéticos associados à operação de uma caldeira *Ventil* de 2.325kWth , nomeadamente o consumo de energia elétrica de equipamentos associados. Também será considerado um balanço energético da caldeira e determinado o seu rendimento.

Desta forma, concluiu-se que a potência do sistema é de $2,32\text{ MJ/s}$, apresentando um rendimento de 82%.

Foram detetados 3 motores mal dimensionados e apresentadas alternativas de substituição. Com um investimento de 577€ seria possível reduzir a fatura energética em 188,1€, obtendo um payback de 3,1 anos.

No entanto, a fatura energética do sistema ultrapassa os 100.000€ anuais, sendo que 90% do investimento é na compra do combustível e os restantes 10% são relativos ao consumo de energia elétrica.

keywords

biomass, boiler, energetic balance, induction motors, electric power, energetic efficiency.

abstract

The pressure caused by energetic resources is boosted by the demographic evolution and economical growth, that have been registered mainly in developing countries. According to some statistical data, the search for energy is essentially related to fossil fuels, which represent about 86,7% of the worldwide consumption mix of primary energy.

The uncertainty about the reserves of non renewable energetic resources , as well as the environmental problems caused by other types of energy, have led to the implementation of measures towards sustainability and energetic efficiency. This way, the increasing use of renewable sources of energy is extremely important.

The biomass is one of the most relevant energetic resources. Its use in boilers provides economical, social and environmental benefits, such as financial savings in fuels, conservation of fossil fuels and the reduction of pollutant emissions.

The boilers developed by companies like Ventil are seen as the solution for the production of thermal energy through the biomass combustion. These systems are described as energetically efficient in the several components of their operation.

Thus, the aim of this thesis is to make a characterization of the energetic consumption connected to the work of a 2.325Wth Ventil boiler, namely, to the electric power consumption of the engines that belong to the system. The energetic balance of the boiler will also be taken into consideration, as well as its output, which will be determined.

This way, we came up to the conclusion that the power of the system is 2.32 MJ/s, with an output of 82%.

Three badly measure engines were detected and replacement alternatives were proposed. With an investment of 577€, it would be possible to reduce the energetic invoice in 188,1 €, getting a payback of 3,1 years.

However, the energetic invoice of the system overtakes 100.000€ annually, and 90% of the investment is spent on fuel. The other 10% are connected to the consumption of electric power.

Índice

Índice.....	i
Índice de Figuras	iv
Índice de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas	vii
Nomenclatura	viii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação e relevância do tema	3
1.2 Objetivos de trabalho.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	4
2 Panorama energético.....	5
2.1 Consumo energético mundial e perspectivas futuras	5
2.1.1 Caracterização Energética de Portugal	10
2.2 Estratégia Europeia para a Energia.....	12
2.3 Estratégia Nacional para a Energia	13
3 Biomassa	15
3.1 Biomassa e suas vantagens.....	15
3.2 Propriedades da biomassa	16
3.2.1 Composição química elementar	17
3.2.2 Humidade	18
3.2.3 Poder calorífico.....	18
4 Apresentação da Empresa <i>Ventil</i>	21
4.1 Descrição das caldeiras <i>Ventil</i>	21
4.1.1 Silo	23
4.1.2 Sistema de transporte por sem-fim	23
4.1.3 Válvula rotativa ou válvula hidráulica	23
4.1.4 Sistema de alimentação por sem-fim.....	23
4.1.5 Caldeira.....	24
4.1.6 Multiciclone.....	25
4.1.7 Ventilador de exaustão	26
4.1.8 Chaminé	27

4.2	Descrição da caldeira em estudo	27
4.3	Equipamentos e sistemas de segurança.....	31
5	Fundamentos teóricos	33
5.1	Conceitos elétricos.....	33
5.2	Corrente contínua e corrente alternada.....	34
5.2.1	Corrente contínua	34
5.2.2	Corrente alternada	35
5.3	Sistema trifásico alternado.....	37
5.3.1	Ligação em estrela.....	38
5.3.2	Ligação em triângulo.....	39
5.4	Potência num sistema trifásico.....	40
5.5	Motores elétricos.....	41
5.5.1	Constituição de um motor assíncrono	42
5.5.2	Princípio do funcionamento de um motor elétrico assíncrono	43
5.5.3	Características dos motores elétricos.....	44
5.5.4	Evolução das classes de eficiência dos motores elétricos.....	53
5.6	Redutor de velocidade	55
5.7	Variador eletrónico de velocidades	55
5.8	Análise energética do processo de combustão numa fornalha a biomassa.....	57
5.8.1	Balço mássico	57
5.8.2	Balço energético	57
6	Metodologia e apresentação de resultados	61
6.1	Balço energético da fornalha em estudo	61
6.1.1	Balço mássico	61
6.1.2	Balço energético	65
6.2	Motores elétricos.....	69
6.2.1	Características elétricas dos motores em estudo	71
7	Apresentação e discussão de resultados.....	75
7.1	Balço energético da fornalha.....	75
7.1.1	Eficiência da caldeira	75
7.1.2	Potência de funcionamento da caldeira.....	76
7.1.3	Energia envolvida no processo	77
7.1.4	Determinação dos caudais de ar envolvidos no processo.....	78
7.2	Análise energética dos motores em estudo.....	79
7.2.1	Análise energética e económica.....	80

7.3	Relação entre o consumo de energia elétrica e de biomassa.....	86
7.4	Alteração do sem-fim para tapete.....	86
8	Conclusão.....	89
8.1	Trabalhos futuros	91
9	Bibliografia	93
10	Anexos.....	97
10.1	Anexo 1 – Caudal das bombas do sistema.....	97

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Consumo mundial de energia primária em 2013. Adaptado de (BP, 2014)...	6
Figura 2.2 - Consumo per capita 2013 (BP, 2014).....	7
Figura 2.3 - Consumo de energia primária por cenário (IEA, 2012).....	8
Figura 2.4 - Evolução do consumo global de energia primária (Matsuo et al., 2013).....	9
Figura 2.5 - Evolução da dependência energética de Portugal (Bernardo, 2013).....	10
Figura 2.6 - Evolução do consumo de Energia Primária por tipo de fonte em Portugal (Bernardo, 2013).....	11
Figura 2.7 - Consumo de energia final por setor em 2012. Adaptado de (DGEG, 2014)..	11
Figura 3.1 - Ciclo do Carbono (Saidur et al., 2011).	16
Figura 4.1 - Caldeira <i>Ventil</i>	22
Figura 4.2 - Lay-out de um sistema <i>Ventil</i> , para de produção de energia térmica, a partir da biomassa.....	22
Figura 4.3 - Silo com fundo móvel.	23
Figura 4.4 - Sem-fim de transporte, válvula hidráulica e sem-fim de alimentação.....	24
Figura 4.5 - Fornalha no interior da caldeira.	25
Figura 4.6 - Permutador de calor de uma caldeira.....	25
Figura 4.7 - Multiciclone de um sistema.	26
Figura 4.8 - Ventilador de exaustão e chaminé.....	27
Figura 4.9 - Lay-out do sistema de produção de energia térmica em estudo.....	28
Figura 4.10 - Locais de monitorização da temperatura e pressão.	30
Figura 5.1 - Modelo de um átomo.....	33
Figura 5.2 - Representação de uma grandeza sinusoidal.....	35
Figura 5.3 - Valor eficaz de uma corrente alternada sinusoidal.	36
Figura 5.4 - Representação esquemática de um alternador trifásico (Matias, 1994).	37
Figura 5.5 - Bobinas U,V,W.....	37
Figura 5.6 - Representação temporal de um sistema trifásico de tensões (Paiva).....	38
Figura 5.7 - Ligação em estrela com representação das tensões simples e compostas (Alves, 1999).....	39
Figura 5.8 - Ligação em triângulo.	40
Figura 5.9 - Distribuição do consumo dos motores elétricos na Indústria Portuguesa (ADENE, 2010).....	41

Figura 5.10 - Classe dos motores elétricos.	41
Figura 5.11 - Constituição de um motor (<i>Francisco, 2006</i>).	42
Figura 5.12 - Diagrama temporal dos binários parciais e total (<i>Matias, 1994</i>).	46
Figura 5.13 - Curva de binário x velocidade (<i>Grundfos, 2004</i>).	46
Figura 5.14 - Triângulo das potências.	48
Figura 5.15 - a) Perdas de um motor em função da carga (<i>Saidur, 2010</i>); b) Rendimento e fator de potência em função da carga do motor.	50
Figura 5.16 - Relação entre Fator de Carga e Eficiência (<i>Saidur, 2010</i>).	52
Figura 5.17 - Relação entre Fator de Carga e Fator de Potência (<i>Saidur, 2010</i>).	52
Figura 5.18 - Comparação entre um alto FC e um baixo FC de um motor.	53
Figura 5.19 - Classes de eficiência de um motor.	54
Figura 5.20 - Caudais mássicos de entrada e saída de um sistema de combustão. (Adaptado de Tarelho, L., 2013)	57
Figura 5.21 - Balanço energético de uma instalação de combustão a biomassa. (Adaptado de Tarelho, L., 2013)	58
Figura 6.1 - Fluxograma da metodologia adotada.	69
Figura 6.2 - Temperatura mínima e máxima da água à saída da caldeira.	70
Figura 6.3 - Analisador de energia 'Vega 76'.	71
Figura 6.4 - Potência absorvida pelo motor associado ao sem-fim de transporte.	72
Figura 6.5 - Potência absorvida pelo motor associado ao sem-fim de alimentação.	73
Figura 6.6 - Potência absorvida pelo motor associado ao ventilador de insuflação I.	73
Figura 6.7 - Potência absorvida pelo motor associado ao ventilador de insuflação II.	73
Figura 6.8 - Potência absorvida pelo motor associado ao ventilador de extração.	74
Figura 6.9 - Potência absorvida pelo motor associado ao sistema hidráulico.	74
Figura 6.10 - Potência absorvida do motor associado à bomba.	74
Figura 7.1 - Quantidades de energia envolvidas no processo.	77
Figura 7.2 - Percentagem de consumo por cada motor.	85
Figura 7.3 - Sistema de transporte atual e proposta de troca para tapete.	87

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades típicas de vários tipos de biomassa. Adaptado de (van Loo e Koppejan, 2008).....	17
Tabela 3.2 - Composição elementar de uma espécie de madeira (<i>Lousada et al. 2010</i>).	18
Tabela 5.1 - Velocidade síncrona em função do número de polos de um motor elétrico.	44
Tabela 5.2 - Poupança de energia pela redução da velocidade (<i>Saidur 2010</i>).	56
Tabela 6.1 - Consumo estequiométrico de oxigénio e massa molar por elemento j.....	63
Tabela 6.2 - Referência utilizada, para o conjunto de produtos gasosos.	63
Tabela 6.3 - Balanço mássico elementar.....	64
Tabela 6.4 – Massa molar e calor específico médio referente a cada espécie j.....	66
Tabela 6.5 - Características dos motores analisados.	72
Tabela 7.1 - Componentes do balanço energético da fornalha em estudo.	75
Tabela 7.2 - Valores típicos do desempenho de uma caldeira <i>Ventil</i> de 2325 kW_{th} . 78	
Tabela 7.3 - Valores obtidos do desempenho da caldeira em estudo.....	79
Tabela 7.4 - Rendimento, Potência mecânica e Carga dos motores em análise.	80
Tabela 7.5 – Análise ao motor do sistema hidráulico.....	81
Tabela 7.6 - Análise ao motor do sem-fim de transporte.	81
Tabela 7.7 - Análise ao motor do sem-fim de alimentação.	82
Tabela 7.8 - Análise ao motor do ventilador de insuflação I.....	82
Tabela 7.9 - Análise ao motor do ventilador de insuflação II.....	83
Tabela 7.10 - Análise do motor da bomba.	83
Tabela 7.11 - Análise ao motor do ventilador de extração.	84
Tabela 7.12 - Balanço da análise energética realizada aos motores.	85

Lista de Abreviaturas

b/d	Barris por dia
CIE	Consumo intensivo de energia
<i>C</i>	Carbono
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
EUA	Estados Unidos da América
FER	Fontes de energia renovável
GEE	Gases com efeito de estufa
<i>H₂O</i>	Água
<i>NO_x</i>	Oxido de Azoto
<i>N₂</i>	Azoto
OCDE	Organização para a cooperação e desenvolvimento económico
<i>OH</i>	Hidróxido
PIB	Produto Interno Bruto
RPM	Rotações por minuto
<i>S</i>	Enxofre
<i>SO₂</i>	Dióxido de enxofre
tep	Tonelada equivalente a petróleo
UE	União Europeia

Nomenclatura

bs	Base seca
btq	Base tal e qual
$C_{p,i}$	Calor específico mássico da espécie i entre T e T^o ($J/kg \cdot K$)
$^{\circ}C$	Graus centígrados
f	Frequência (Hz)
FC	Fator de carga (%)
$FP (\cos \varphi)$	Fator de potência
G_t	Gases húmidos ($kmol_{gases\ de\ combust\tilde{a}o}/kg_{biomassa,bs}$)
$G_{t,s}$	Gases secos ($kmol_{gases\ de\ combust\tilde{a}o\ secos}/kg_{biomassa,bs}$)
I	Corrente elétrica (A)
I_r	Corrente medida na chapa de características do motor (A)
J	Joule
K	Kelvin
kJ	quilo joule
M_j	Massa molar de cada elemento j ($kg_j/kmol_j$)
m_w	massa de água por kg de biomassa ($kg_{H_2O}/kg_{biomassa,bs}$)
\dot{m}	caudal mássico
n_i	abundância do produto gasoso i ($kmol_i/kg_{biomassa,bs}$)
n	Velocidade do campo girante do motor (rpm)
n_s	velocidade síncrona (rpm)
PCI	Poder calorífico inferior ($kJ/kg_{biomassa}$)
PCS	Poder calorífico superior ($kJ/kg_{biomassa}$)
P	Potência ativa (W)
P_{chapa}	Potência escrita na chapa de características de um motor (kW)
$P_{mecânica}$	Potência mecânica (W)
P_{medida}	Potência medida (W)
Q	Potência reativa (Var)
R	Resistência elétrica (Ω)
s	deslizamento (%)
S	Potência aparente (VA)

T	Período (s)
T^o	temperatura de referência
U_c	Tensão composta (V)
U_s	Tensão simples (V)
V	Tensão (V)
V_r	Tensão escrita na chapa de características do motor (V)
W_a	Consumo atual de O_2 ($kmol_{O_2 \text{ atual}}/kg_{biomassa,bs}$)
W_s	Necessidade estequiométrica de O_2 ($kmol_{O_2 \text{ esteq.}}/kg_{biomassa,bs}$)
w_{jR}	Fração mássica do elemento químico j numa mistura em base seca (kg_j/kg_R)
w_{WH}	Fração mássica da humidade numa mistura em base tal e qual (kg_{H_2O}/kg_H)
W_{WR}	Razão mássica da humidade numa mistura em base seca (kg_{H_2O}/kg_R)
$Y_{S,j}$	Consumo estequiométrico de O_2 ($kmol O_2/kmol_j$)
z	Excesso de ar (%)
Ω	Ohm
ω	Frequência angular (rad/s)
φ	fase (rad)
η	Rendimento (%)
$\Delta H_{reagentes}$	Energia dos reagentes ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)
$\Delta H_{produtos}$	Energia dos produtos ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)
$\Delta H_{perdido}$	Energia perdida ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)
$\Delta H_{\text{útil}}$	Energia útil ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)
$\Delta H_{S,R}$	Calor sensível dos reagentes ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)
$\Delta H_{S,P}$	Calor sensível dos produtos ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)
$\Delta H_{L,R}$	Calor latente dos reagentes ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)
$\Delta H_{L,P}$	Calor latente dos produtos ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)
$\Delta H_{R,R}$	Calor de reação de combustão dos reagentes ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)
$\Delta H_{R,P}$	Calor de reação de combustão dos produtos ($kJ/kg_{biomassa,bs}$)

Subscriptos

R	Mistura do resíduo em base seca (bs)
---	--------------------------------------

1 Introdução

A energia representa desde a geração pré-histórica, um papel fundamental no desenvolvimento social e económico da humanidade. A capacidade de realizar trabalho das diversas fontes de energia, garantem conforto pessoal e mobilidade, sendo também essencial na geração de riqueza industrial, comercial e social (*EEA Report N8/2006*). No entanto, a sua produção e utilização tem custos associados, nomeadamente, graves problemas ambientais, como as emissões de gases com efeito de estufa (*GEE*) e a geração de resíduos, os quais contribuem para a ocorrência de mudanças climáticas, danos no meio ambiente, trazendo consequências e efeitos adversos à saúde humana.

A população é o principal fator pela procura de energia. Julga-se que da atualidade até 2035, a população mundial deverá crescer de 7 mil milhões para 8,7 mil milhões de pessoas, muito devido ao aumento de habitantes nos continentes Asiático e Africano. Como país em desenvolvimento, a Índia tornar-se-á o país mais populoso a nível mundial, ultrapassando a China (*IEA, 2013a*). Assim, para suprir as futuras necessidades humanas, registar-se-á igualmente um aumento da procura de energia. Os combustíveis fósseis, conhecidos como não renováveis, irão continuar a ter um papel fundamental no abastecimento de energia primária a nível mundial, e no futuro, a China e Índia, serão os principais importadores de petróleo e carvão, respetivamente (*IEA, 2013b*).

Principalmente devido ao tema da alterações climáticas, em 1997, foi assinado no Japão o primeiro tratado internacional com o objetivo de limitar as emissões de *GEE*, conhecido por Protocolo de Quioto. Além disso, assuntos como o desenvolvimento sustentável, o aumento de eficiência, e a promoção das fontes de energia renováveis (*FER*), foram também destacados como metas para o futuro (*United Nations, 1998*). Hoje em dia, as energias renováveis contribuem com uma importante fatia do total dos consumos da população mundial. Entre elas encontram-se a hídrica, eólica, solar e também a biomassa como as mais importantes.

A biomassa é utilizada como combustível para geração de energia elétrica em centrais elétricas, mas principalmente como fonte de calor, sendo a fonte de energia mais preciosa nos tempos dos nossos ancestrais, e que está normalmente associada a

comunidades rurais. Atualmente, cerca de 2.600 milhões de pessoas no mundo, dependem ainda do uso tradicional da biomassa para cozinhar (IEA, 2013b).

Durante as últimas décadas, a utilização de biomassa teve a influência de diversos fatores associados às fontes de combustível não renovável, nomeadamente, o petróleo. No entanto, a produção e utilização de recursos petrolíferos tem sido igualmente inconstante ao longo dos anos. Conflitos político-económicos, guerras ou simplesmente a entrada em declínio das reservas de petróleo, são causas que interferem na estabilidade do ramo energético.

Assim, perante o alerta do esgotamento dos combustíveis fósseis, aliado à crescente procura de energia e à temática ambiental, os países desenvolvidos viram-se obrigados a repensar as suas políticas energéticas, pelo que as *FER* passariam a ser cada vez mais importantes, das quais, a biomassa se destaca devido à sua farta disponibilidade e reduzidas emissões de *GEE*.

Comparando com outras fontes de combustíveis convencionais, uma das suas principais vantagens é que pode ser aproveitada diretamente a partir da combustão em caldeiras, em ambientes industriais, de serviços ou comunitários. No entanto, devido à existência de motores elétricos associados, para além da biomassa é necessária outra fonte de energia, ou seja, a eletricidade.

Os motores elétricos são capazes de transformar energia elétrica em energia mecânica, sendo indispensáveis na indústria assim como em outros setores, nos quais, a sua utilização trás numerosas vantagens. Segundo (Ferreira & de Almeida, 2012) estas máquinas consomem cerca de 40% da energia elétrica em todo o mundo, sendo também responsáveis por cerca de 13% das emissões globais de CO_2 . No entanto, esta é uma área na qual existe um grande potencial para melhorias da eficiência energética, visando a redução dos consumos de energia, das emissões de *GEE* e também na poupança de recursos energéticos limitados, neste caso, essencialmente o petróleo e o carvão utilizados para a produção de eletricidade.

1.1 Motivação e relevância do tema

Com o desenvolvimento dos processos tecnológicos do Homem, as suas necessidades aumentaram relativamente ao consumo de energia. No entanto, com a introdução de novas tecnologias é possível manter a mesma atividade, estilo de vida ou conforto, com uma redução na fatura energética. A este conceito dá-se o nome de eficiência energética, a qual aponta para uma utilização de energia mais responsável e para a adoção de medidas que levam a um consumo racional de energia, atuando diretamente na redução de impactes ambientais e na redução de custos.

Desde a transformação das fontes de energia primárias até ao seu aproveitamento final, a eficiência dos sistemas de conversão, transporte e operação de equipamentos é essencial para reduzir ao máximo as perdas associadas a cada processo.

Também as fontes de energia ditas como renováveis assumem um papel cada vez mais importante na preservação dos recursos fósseis. A diversificação e aumento de produção das fontes renováveis de energia, procuram ir ao encontro de uma sustentabilidade energética e ambiental para os dias futuros. Neste sentido, a substituição dos combustíveis fósseis pela biomassa, num processo de produção de energia térmica mostra ser uma solução viável a todos os níveis.

Portanto, este tema apresenta uma elevada relevância nos dias de hoje, representando uma estratégia de segurança para o abastecimento de energia para o futuro.

1.2 Objetivos de trabalho

Com este trabalho pretende-se efetuar uma análise energética a uma caldeira a biomassa com uma potência nominal de 2.320 kW_{th} , instalada numa empresa do ramo agroalimentar. Os objetivos deste trabalho incluem:

- A realização do balanço energético a uma caldeira, e calcular o seu rendimento com base na conversão da energia química presente na biomassa em energia calorífica.
- Caracterizar os consumos elétricos associados aos motores elétricos utilizados nas várias etapas do processo.
- Identificar medidas para a redução dos consumos de energia elétrica.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos. No primeiro capítulo encontra-se descrito o contexto em que se insere este trabalho, a motivação para a sua realização, assim como os objetivos que se pretendem alcançar.

No capítulo 2 está exposto um panorama energético, relativo ao consumo de energia primária, à escala global e nacional. Está descrita a evolução da procura de energia e a sua tendência futura. Também será apresentado um conjunto de medidas a aplicar na União Europeia (UE) e Portugal.

O capítulo 3 faz uma abordagem às vantagens da biomassa como recurso de energia renovável. Encontram-se também descritas algumas características da biomassa, as quais, são importantes para o balanço energético da caldeira em estudo.

No capítulo 4 faz-se uma breve apresentação da empresa *Ventil - Engenharia do Ambiente, Lda*, assim como das caldeiras fabricadas. Aqui, faz-se igualmente uma descrição ao processo de funcionamento da caldeira em estudo.

O capítulo 5 é composto por conteúdos teóricos relativos ao processo de análise energética do sistema. Foram abordados alguns conceitos referentes ao balanço energético da caldeira, assim como às características de operação dos motores elétricos.

No capítulo 6 é apresentada a metodologia e o procedimento utilizados no balanço energético efetuado, assim como, ao estudo do funcionamento dos motores elétricos presentes no sistema.

No capítulo 7, faz-se uma apresentação e discussão dos resultados obtidos.

Por último, as conclusões retiradas deste trabalho serão apresentadas no capítulo 8. Neste capítulo são ainda referenciadas algumas propostas de trabalhos futuros.

2 Panorama energético

A energia constitui um contributo essencial para suprir quase todas as necessidades humanas e de processos de produção. O esperado crescimento populacional, liderado pelos países de Ásia e África, previsto em 1,7 milhões de pessoas até 2035, deverá fazer com que as necessidades de energia aumentem significativamente. Da mesma forma, a atividade económica é outro fator que tem uma forte relação com a procura de energia. A última recessão económica, sobretudo na Europa, teve um impacto muito relevante no setor energético, levando ao abrandamento da procura. Depois dessa recessão, as economias mundiais têm vindo a recuperar, e no período entre 2010 e 2035 espera-se que o produto interno bruto (*PIB*)¹ cresça em média 3,5% ao ano (*IEA*, 2012). No entanto, é provável que essa taxa diminua gradualmente à medida que as economias emergentes amadurecem.

De seguida será apresentada uma descrição da situação atual e futura do cenário energético mundial e, em particular, de Portugal. Também serão abordadas as estratégias de futuro para a energia na Europa e Portugal.

2.1 Consumo energético mundial e perspectivas futuras

No ano de 2013, o consumo global de energia primária² aumentou cerca de 2,3% relativamente ao ano de 2012, no qual já havia registado um aumento de 1,8% face a 2011 (*BP*, 2014). Em resposta ao aumento das necessidades energéticas, estes valores revelam um constante crescimento no consumo de energia primária, sobre as quais predomina a procura nos combustíveis fósseis, que contribuíram em 2013 com cerca de 86,7% do consumo mundial de energia primária. A Figura 2.1 representa a matriz energética atual, e as correspondentes taxas de consumo por cada fonte de energia primária.

¹ *PIB* (Produto Interno Bruto) de um país é o montante de bens e serviços por ele produzidos num dado ano.

² Energia primária é o recurso energético disponível na natureza, que ainda não sofreu qualquer processo de transformação ou conversão. Exemplos destes recursos são o petróleo, gás natural, carvão, energia hídrica, energia eólica, energia solar, energia nuclear, biomassa, etc...

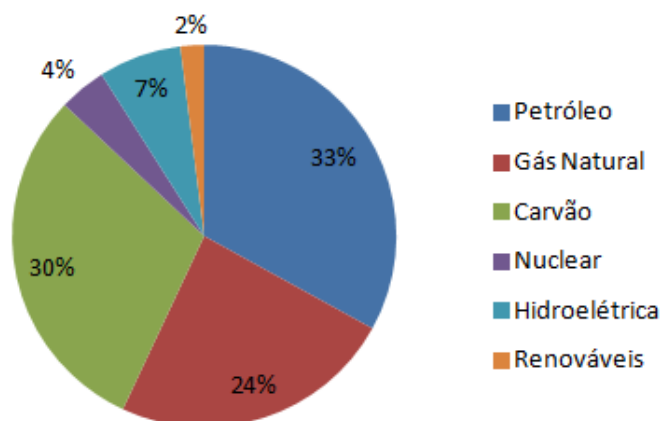


Figura 2.1 – Consumo mundial de energia primária em 2013. Adaptado de (BP, 2014).

Segundo os valores do *Statistical Review of World Energy* da *British Petroleum*, o consumo global de energia primária rondou valores próximos a 12.730 milhões de tep³, mais 2,3% do que em 2012. As economias em desenvolvimento são responsáveis por cerca de 80% desse crescimento.

Entre os combustíveis fósseis, o carvão obteve uma taxa de crescimento do consumo de 3%. Cerca de 89% deste valor corresponde aos países que não pertencem à Organização para Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE)⁴, sendo que só a China utilizou metade de toda a produção mundial de carvão.

Relativamente ao petróleo, o consumo mundial aumentou 1,4%, ou seja, para 91,3 milhões de barris por dia (b/d). No entanto, pela 7ª vez nos últimos 8 anos, a procura pelo petróleo nos países da OCDE registou um decréscimo, diminuindo 0,4% em 2013. Pelo contrário, nos países não pertencentes à OCDE, a procura tem vindo a subir todos os anos da última década, registando 3,1% no último ano. De registar ainda que, os Estados Unidos da América (EUA) como maior consumidor mundial de petróleo (19,9%), aumentou o volume das suas produções em cerca de 13,5%, resultando na extração de mais 1,1 milhões de b/d. Da mesma forma, o gás natural registou um aumento do consumo de 1,4%, sendo o seu consumo liderado também pelos EUA, com 22,2%.

³Tep – tonelada equivalente de petróleo. 1 tep corresponde a 42GJ.

⁴Países OCDE: Alemanha, Áustria, Austrália, Bélgica, Canadá, Coreia do Sul, Dinamarca, Espanha, Eslováquia, Estados Unidos da América, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Polónia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suécia, Suíça e Turquia.

O acidente de Fukushima, no Japão, prejudicou as políticas e os planos de expansão nuclear por todo o mundo, levando alguns produtores a perderem o seu interesse nesta fonte energética (*Matsuo et al., 2013*). No entanto, a produção de energia elétrica a partir da energia nuclear cresceu 0,9% em 2013, tendo sido esta a 1ª subida desde 2010.

Quanto à produção elétrica a partir da energia hídrica, houve um aumento de 2,9% relativamente a valores de 2012. Já a produção de energia elétrica por outras fontes de energia renovável tiveram um crescimento de 16,3%. Este aumento foi impulsionado principalmente pelos *EUA* e China que, em conjunto, contribuíram com 44,5% do crescimento global.

Após a crise económica de 2008, o consumo de energia tem vindo a aumentar de ano para ano, invertendo a nível global o declínio da intensidade energética⁵ (*IEA, 2012*). Grande parte desse aumento vem dos países em desenvolvimento. No entanto, os *EUA* como país desenvolvido, lideraram praticamente o aumento no consumo de todas as fontes de energia exceto no carvão, sendo um dos principais consumidores per capita, Figura 2.2.

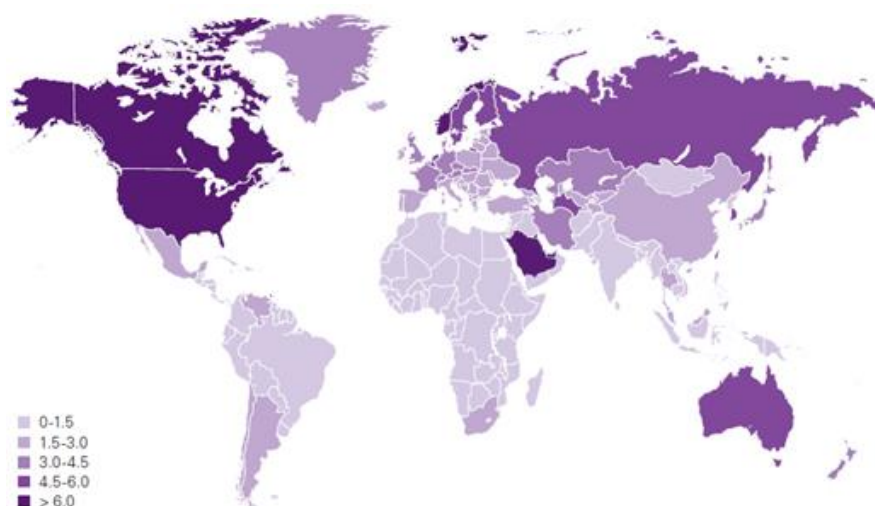


Figura 2.2 - Consumo per capita 2013 (*BP, 2014*).

Já a China e Índia, os dois outros grandes consumidores de energia, veem o seu consumo per capita mais reduzido, devido ao seu elevado número de habitantes.

⁵Intensidade energética – quantidade de energia usada para produzir uma unidade de PIB.

No futuro, o aumento pela procura de energia irá criar uma maior pressão sobre os recursos energéticos. Para que se perceba a importância deste tema, a *IEA*⁶ lança um documento de análise anual anual, o *World Energy Outlook* (WEO), com a análise e projeções a médio prazo dos temas ligados à energia e emissões resultantes da sua produção e utilização.

Segundo a publicação de 2012 (*IEA*, 2012), são três os cenários apresentados da evolução dos consumos até 2035: o cenário das políticas atuais, o cenário das novas políticas e o cenário 450. O primeiro cenário prevê o resultado do consumo energético, sem alteração das medidas implementadas até 2012. O cenário das novas políticas leva em conta os planos já implementados, bem como os enunciados, ainda que não introduzidos nessa política. Estes novos planos passam por aumentar a produção de energias renováveis, aumento de eficiência, e metas de redução de *GEE*. Por último, o cenário 450 faz uma previsão do consumo energético, no caso de serem implementadas políticas de limitação do CO_2 na atmosfera a um máximo de 450 ppm⁷. Na Figura 2.3 está representada a evolução do consumo de energia até ao ano 2035.

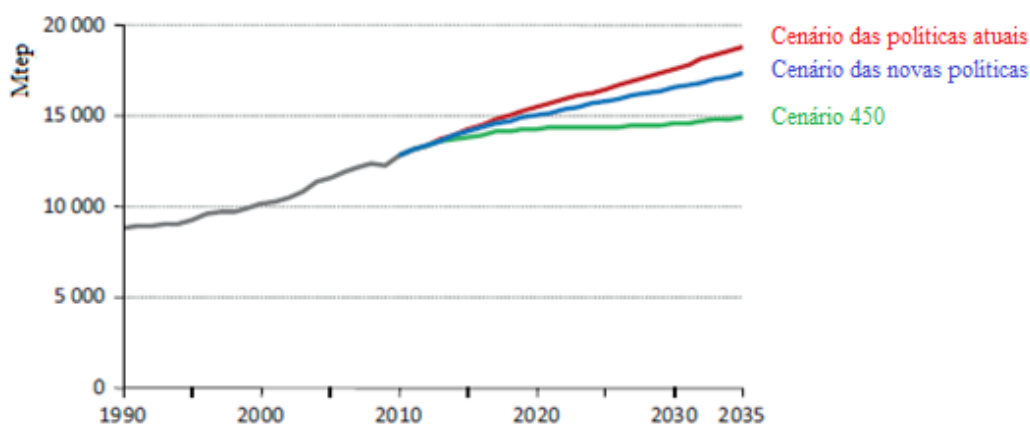


Figura 2.3 - Consumo de energia primária por cenário (*IEA*, 2012).

Segundo o cenário das novas políticas, a procura de energia entre 2010 e 2035 deverá aumentar cerca de 35% (*IEA*, 2012). Principalmente nos países não membros da *OCDE*, os combustíveis fósseis continuarão a ser os principais responsáveis pelo aumento global da procura de energia primária em 80%, sendo o petróleo o combustível

⁶International Energy Agency (IEA), é um organismo constituído em 1974, com objetivo de promover a segurança energética, proteção ambiental e desenvolvimento económico entre os seus países membros.

⁷ppm – partes por milhão.

mais importante no *mix*⁸ de energia (Matsuo *et al.*, 2013). Para contrariar esta tendência, os governos de vários países têm planos muito ambiciosos no sentido de mudar a sua matriz energética, com base no aumento das energias renováveis e de outras com baixo teor em carbono, como o gás natural e a biomassa (Bilgen, 2014). Na Figura 2.4 está representada a distribuição dos consumos por fonte de energia primária.

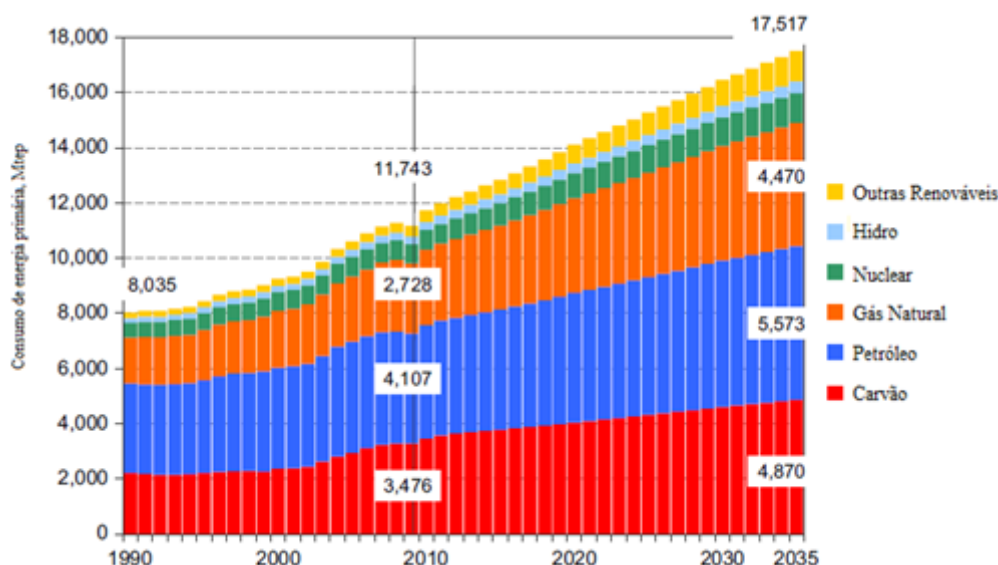


Figura 2.4 - Evolução do consumo global de energia primária (Matsuo *et al.*, 2013).

Em 2035 os combustíveis fósseis irão permanecer como as principais fontes de energia em todo o mundo. Mesmo com percentagens inferiores às atuais, o petróleo e o carvão manter-se-ão como os mais utilizados no total do *mix* energético, havendo uma subida na utilização de gás natural e das *FER*. Esta tendência deverá notar-se mais nos países desenvolvidos.

O crescimento do consumo de energia primária irá variar regionalmente pelo mundo. Enquanto que nos países da *OCDE* a procura vai subir ligeiramente, os países não membros serão responsáveis por 90% desse aumento, evoluindo no total do consumo mundial de 53% para 66% em 2035. Este facto terá consequências na participação económica dos países da *OCDE* que decresce de 72% para 58%. (Matsuo *et al.*, 2013). Como exemplo, espera-se uma evolução do consumo na Ásia em 80%, e a consolidação da China como maior consumidor de energia do mundo, 77% acima do consumo dos *EUA* (IEA, 2012).

⁸Mix energético – distribuição percentual das fontes de energia primária.

2.1.1 Caracterização Energética de Portugal

Portugal é um país com escassez de recursos energéticos fósseis, apesar destes assegurarem a grande parte das necessidades energéticas do país. Como demonstra a Figura 2.5, a dependência energética do exterior andou em 2012 à volta dos 80%, sendo que 75% correspondem à importação de combustíveis fósseis e a restante parcela é proveniente de resíduos industriais e da importação de energia elétrica (DGEG, 2014).

No entanto, devido ao aumento de utilização da energia de fontes renováveis, a dependência energética portuguesa tem vindo a baixar durante os últimos anos. Embora a energia hídrica e eólica sejam consideradas como as mais importantes, é essencial diversificar no uso das fontes de energia primária, passando a considerar a energia solar, geotérmica e a biomassa como muito relevantes para o objetivo de diminuir a utilização de recursos limitados e a sua compra ao exterior, mas também de reduzir a intensidade carbónica atual.

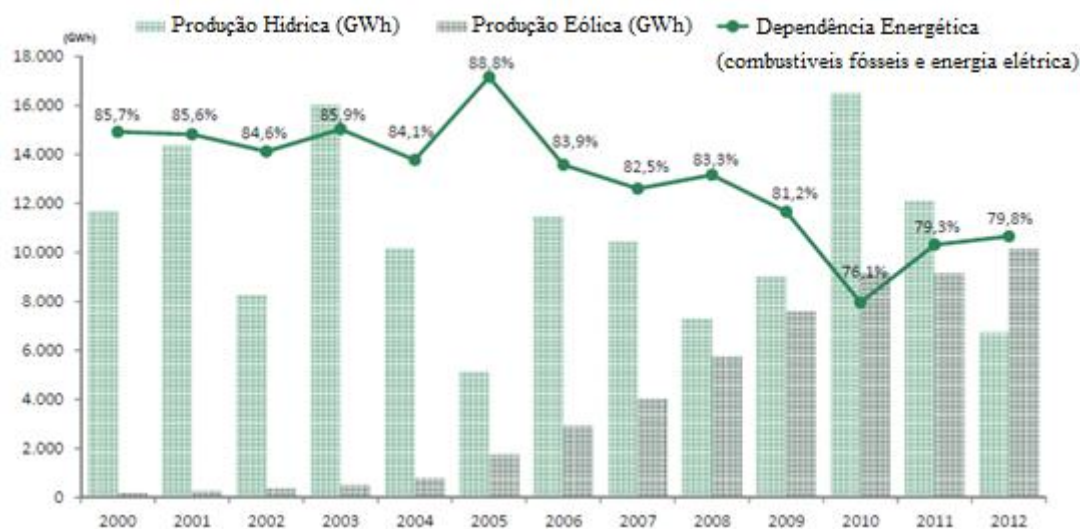


Figura 2.5 - Evolução da dependência energética de Portugal (Bernardo, 2013).

Na última década a utilização de energia primária teve um crescimento até 2005, tendo a partir daí apresentado uma queda até ao ano de 2012. No entanto, o consumo tem vindo a reduzir com uma taxa média anual de 1,3%. Assim, em 2012, o consumo diminuiu 15% em relação a 2000 e 21% face a 2005 (Bernardo, 2013). Os planos para a eficiência energética, o uso de novas tecnologias e também a crise económica de 2008 foram os principais responsáveis pelo panorama apresentado.

No que diz respeito ao *mix* do consumo de energia primária, Figura 2.6, o petróleo foi a fonte mais utilizada dos últimos anos. Ainda assim, é perceptível a diminuição no seu uso, passando de 59% em 2005 para 43% em 2012 (APA, 2013). Esta diminuição foi compensada pelo aumento da utilização de gás natural e dos recursos renováveis.

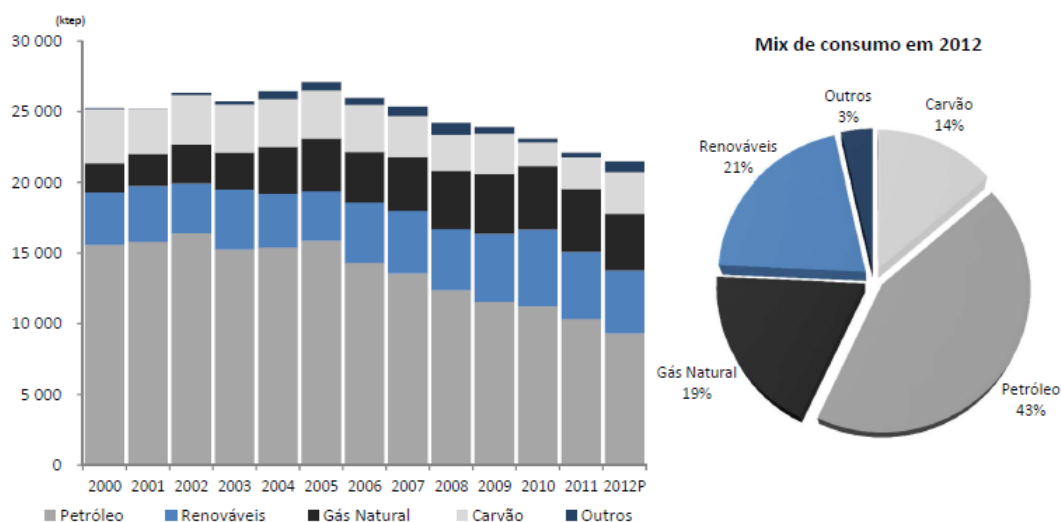


Figura 2.6 - Evolução do consumo de Energia Primária por tipo de fonte em Portugal (Bernardo, 2013).

Relativamente ao consumo de energia final, os setores dos transportes e indústria são responsáveis por quase 70% do consumo total de energia. O setor doméstico, de serviços e a agricultura e pescas completam o total da energia consumida, Figura 2.7.

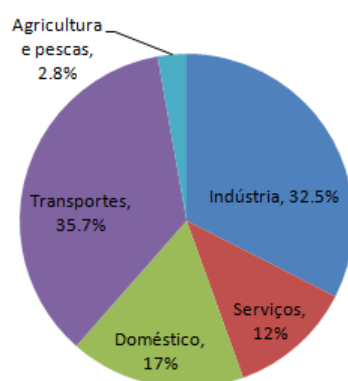


Figura 2.7 - Consumo de energia final por setor em 2012. Adaptado de (DGEG, 2014).

2.2 Estratégia Europeia para a Energia

A necessidade de um novo padrão energético sustentável e o abrandamento das alterações climáticas, são dos maiores desafios que o mundo atualmente enfrenta. Neste contexto, têm sido desenvolvidos esforços para a aplicação de políticas energéticas, tanto a nível europeu como nacional.

Em Março de 2006, a Comissão das Comunidades Europeias lançou o Livro Verde ‘Estratégia europeia, para uma energia sustentável, competitiva e segura’, tendo sido uma marca importante para o desenvolvimento de uma política energética comum a todos os países da europeus. Esta política assenta sobre três grandes objetivos: a sustentabilidade energética e ambiental, com promoção das fontes de energia renovável, eficiência energética e luta contra as alterações climáticas; a competitividade económica, pela globalização dos mercados internos de energia; e a segurança de aprovisionamento, para melhor coordenar a oferta e procura energética dentro da *UE* (*CCE*, 2006).

No seguimento das medidas enunciadas pelo Livro Verde, em 2007, os decisores políticos da *UE* fixaram objetivos vinculativos que constituem nova estratégia a médio prazo, denominada por Pacote Energia-Clima ‘20 – 20 – 20’, da qual se resumem os seguintes aspetos (*CUE*, 2007):

- Aumento da eficiência energética, a fim de reduzir o consumo em 20%, em relação à projeção para 2020 na *UE*.
- Aumento da taxa de penetração de energias renováveis em 20% até 2020, em relação ao consumo total de energia na *UE*.
- Meta mínima de 10% de biocombustíveis no consumo total de gasolina e gasóleo para transportes.
- Atingir em 2020 uma redução de pelo menos 20% das emissões de *GEE*, em relação a 1990.

2.3 Estratégia Nacional para a Energia

Em Abril de 2010 foi aprovada através da *Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010 (DR, 2010)* a Estratégia Nacional para a Energia (*ENE2020*), a qual assenta sobre os seguintes objetivos:

- Estimular a competitividade, o crescimento e reduzir a dependência energética face ao exterior para 74% em 2020.
- Aposta nas energias renováveis de forma a obter 31% de toda a energia e 60% da eletricidade consumida em Portugal, assim como, a sua inclusão no consumo energético dos transportes em 10%, em 2020.
- Promoção da eficiência energética, consolidando o objetivo de redução de consumo de energia final em 10% até 2015 e 20% até 2020.
- Garantir a segurança de abastecimento, através da diversificação do *mix* energético.
- Sustentabilidade económica e ambiental, promovendo a redução de emissões.

Neste sentido, para assegurar os objetivos propostos, o Governo criou o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (*PNAEE 2016*), o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (*PNAER 2020*) e o Programa de Eficiência Energética na Administração Pública (*ECO.AP*), o qual tem o objetivo de redução de 30% do consumo neste setor. Estes planos são instrumentos de planeamento energético que estabelecem o modo de alcançar as metas e os compromissos internacionais assumidos por Portugal (*DR, 2013*).

Relativamente ao *PNAEE*, as áreas específicas de atuação são: os Transportes, Residencial e Serviços, Indústria e Estado. A promoção para a racionalização de consumos e eficiência energética é o princípio deste programa. Segundo (*DR, 2013*), devido à recessão económica em Portugal, o consumo de energia diminuiu, contrariando a provável tendência de evolução até 2020. Também, devido ao cenário otimista de instalação de potência *FER*, foram cumpridas as metas definidas pelo *PNAEE* de 2008. Desta forma, foi criado o *PNAEE 2016*, com objetivos mais ambiciosos do que o anterior, uma vez que pretende diminuir em 25% o consumo de energia primária até 2020.

No mesmo âmbito da *ENE2020* e *PNAEE*, em Abril de 2008, foi publicado o *Decreto-Lei nº 71/2008 (DR, 2008)*, que regulamenta o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (*SGCIE*), aplicável à indústria. Este sistema tem o objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos das instalações consumidoras intensivas de energia (*CIE*). Assim, o regime previsto no presente Decreto-Lei aplica-se às instalações *CIE* que no ano civil anterior tenham apresentado um consumo energético superior a 500 tep (500 tep/ano). Assim:

- As instalações com consumo de energia igual ou superior a 500 tep/ano, mas inferior a 1000 tep/ano devem:
 - ✓ Realizar auditorias com periodicidade de 8 anos.
 - ✓ Implementar todas as medidas identificadas com período de retorno máximo de investimento de 3 anos.
 - ✓ Melhorar 4% a IE^9 em 8 anos.
 - ✓ Manter os valores históricos de IC^{10} , como meta mínima.
- As instalações com consumo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano devem:
 - ✓ Realizar auditorias com periodicidade de 6 anos.
 - ✓ Implementar todas as medidas identificadas com período de retorno máximo de investimento de 5 anos.
 - ✓ Melhorar 6% a IE em 6 anos.
 - ✓ Manter os valores históricos de IC , como meta mínima.
- As instalações com consumo inferior a 500 tep/ano podem aderir de forma voluntária ao *SGCIE*.

⁹ IE (Intensidade Energética) = $\frac{\text{Consumo total de energia}}{\text{Valor acrescentado bruto}}$

¹⁰ IC (Intensidade carbónica) = $\frac{\text{Valor das emissões de GEE}}{\text{Consumo total de energia}}$

3 Biomassa

O território português está ocupado em 38% por floresta. Por ano são produzidos cerca de 6,5 milhões de toneladas de madeira, sendo consumidos ou transformados noutros produtos bioenergéticos, cerca de 2,2 milhões de toneladas no mesmo período (PER, 2014). A produção de energia a partir da biomassa corresponde a cerca de 15% da geração de energia a partir de fontes renováveis em Portugal (FC, 2010).

Como as caldeiras *Ventil* utilizam biomassa para produção de energia térmica, no presente capítulo serão descritas as características deste combustível e as vantagens da sua utilização. Serão também abordadas algumas propriedades importantes da biomassa.

3.1 Biomassa e suas vantagens.

Segundo a Diretiva 2009/28/CE, relativa à promoção de utilização de energia proveniente de fontes renováveis, a biomassa é definida como “a fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica proveniente da agricultura (incluindo substâncias de origem vegetal e animal), da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo a pesca e da aquicultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos”.

Portanto, de uma forma geral, a biomassa consiste na matéria orgânica resultante das plantas, a qual é produzida a partir do processo de fotossíntese. Neste processo, a energia solar é captada pelas plantas e convertida em energia química, utilizada para a síntese de matéria orgânica. É essencial também a absorção de outros minerais e a fixação de CO_2 presente na atmosfera, sofrendo a transformação em outras moléculas de carbono.

Segundo (Saidur et al., 2011), pela combustão de biomassa, ou pela sua conversão noutros combustíveis, o carbono reage com o oxigénio presente no ar, voltando a formar CO_2 libertado para a atmosfera. No entanto, a quantidade de CO_2 libertado será equivalente à quantidade que anteriormente fora fixada durante o crescimento da planta, ficando novamente disponível para um novo processo de fotossíntese. Assim a

biomassa adquire o estatuto de energia limpa, pois o balanço de emissões do carbono é nulo. Este é um processo cíclico conhecido por ‘ciclo do carbono’, Figura 3.1.

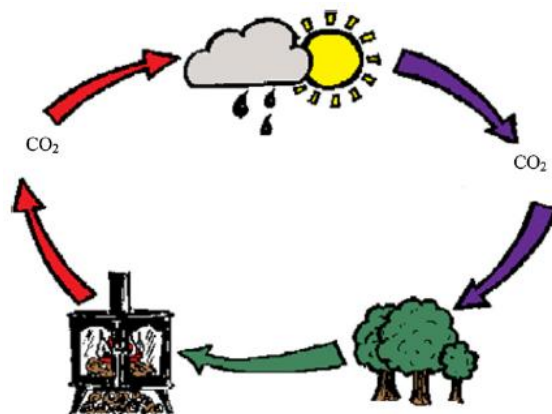


Figura 3.1 - Ciclo do Carbono (Saidur et al., 2011).

Independentemente das condições de humidade, a biomassa apresenta uma densidade energética mais reduzida do que os combustíveis fósseis. No entanto, a sua utilização tem vindo a aumentar em processos de conversão de energia, pois apresenta várias vantagens em relação a outros tipos de combustível: é uma fonte de energia renovável financeiramente viável, apresenta uma grande reatividade durante a sua conversão, reduzida formação de cinzas (por exemplo na combustão de pellets) e reduzida emissão de compostos perigosos como CO_2 e NO_x , etc.

3.2 Propriedades da biomassa

As propriedades físicas de cada tipo de biomassa impõem algumas restrições à sua utilização direta, pelo que por vezes é necessário o seu processamento prévio com o objetivo de se obterem as características adequadas aos processos de conversão energética.

As caldeiras *Ventil* podem queimar diferentes tipos de biomassa, como pellets, estilha, entre outros tipos de biomassa resultantes de culturas dedicadas e resíduos ou subprodutos resultantes de diferentes processos industriais ou agroflorestais (resíduos de madeira, resíduos florestais, bagaço e caroço de azeitona, cascas de frutos secos, etc.).

Do ponto de vista da caracterização destes combustíveis as análises mais comuns são: a análise imediata e a análise elementar.

A análise imediata é a mais simples análise de um combustível sólido, fornecendo informação sobre a sua composição relativamente ao teor em humidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas. Por sua vez a análise elementar consiste na determinação das frações mássicas dos elementos químicos que compõem um combustível. Os resultados deste estudo para um determinado material são importantes para os cálculos dos balanços mássicos e energéticos do sistema de conversão energética. Na Tabela 3.1 estão presentes algumas propriedades de diferentes tipos de biomassa.

Tabela 3.1 - Propriedades típicas de vários tipos de biomassa. Adaptado de (van Loo e Koppejan, 2008).

	<i>Humidade</i> (%H ₂ O, btq)	<i>PCS</i> (kJ/kg, btq)	<i>PCI</i> (kJ/kg, btq)	<i>Massa</i> <i>volúmica</i> (kg/m ³ , btq)	<i>Densidade</i> <i>energética</i> (MJ/m ³ , btq)
Pellets	10,0	19800	16400	600	9840
Estilha seca	30,0	19800	12200	250 – 320	3050 – 3900
Estilha	50,0	19800	8000	350 – 450	2800 – 3600
Casca	50,0	20200	8200	320	2620
Serrim verde	50,0	19800	8000	240	1920
Palha	15,0	18700	14500	120	1740
Bagaço azeitona	53 – 63	21500 – 22600	6100 – 8500	650 – 1130	5530 – 6890

Estes parâmetros são importantes do ponto de vista da conversão energética da biomassa, pelo que, a realização do balanço energético de um sistema de conversão, está dependente destes valores. Desta forma, a caldeira em análise foi alimentada com estilha (humidade = 40%) da espécie de madeira considerada na Tabela 3.2. Também, a composição elementar química é uma propriedade relevante para a utilização de um combustível.

3.2.1 Composição química elementar

Efetuando uma análise elementar a um determinado tipo de biomassa, é possível obter a fração mássica dos vários elementos químicos desse produto, sendo a base para a análise do processo de combustão, para a obtenção de volumes de ar e gases, entalpias e para a determinação do poder calorífico desse combustível.

Segundo o estudo realizado por (Vassilev *et al.*, 2010), verifica-se que a composição elementar da biomassa varia de acordo com o tipo de combustível. Assim, para o presente documento, recorreu-se ao estudo realizado por (Lousada *et al.*, 2010), o qual apresenta uma aproximação da composição elementar da biomassa, de uma espécie resinosa utilizada em Portugal. O carbono (C), o hidrogénio (H) e o oxigénio (O) são os principais constituintes deste tipo de biomassa, Tabela 3.2, tal como de outros combustíveis bioenergéticos.

Tabela 3.2 - Composição elementar de uma espécie de madeira (Lousada *et al.* 2010).

	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Resinosas ¹¹	48,8	5,8	44,9	0,2	0,01

3.2.2 Humidade

O teor em humidade varia significativamente entre os diferentes tipos de biomassa, dependendo das condições em que é preparada e armazenada. É um parâmetro com grande influência no processo de combustão, pois os combustíveis com elevado teor de humidade requerem um maior tempo de residência para secar, antes da sua própria combustão.

3.2.3 Poder calorífico

O poder calorífico de um combustível representa o valor da energia química contida nesse combustível, e que a partir da sua combustão é convertida em energia calorífica. Esta é a propriedade mais importante de um combustível, pois determina o seu valor energético (Erol *et al.*, 2010). Devido à existência de humidade na biomassa, pode ser definido o poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI); a diferença entre ambos reside no estado em que se encontra a água durante o processo de combustão (Tarelho, L., 2013). Assim, o PCS é a soma da quantidade de energia libertada sob a forma de calor e a energia gasta na vaporização da água presente no combustível, durante a combustão. Este valor pode ser obtido pela (Eq. 3.1), a qual depende dos valores das frações mássicas de cada elemento, com base na análise elementar do combustível.

¹¹ Resinosas - Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster*), Pseudotsuga (*Pseudotsuga menziesii*) e Cedro (*Cedrus atlantica*)

$$PCS = 34,91 \times w_{CR} + 117,83 \times w_{HR} + 10,05 \times w_{SR} - 10,34 \times w_{OR} - 1,51 \times w_{NR} - 2,11 \times w_{ZR} \text{ (kJ/kg}_{biomassa,bs}\text{)} \quad (Eq. 3.1)$$

O *PCI* é a quantidade de energia libertada sob a forma de calor, considerando que a água resultante do processo de combustão já se encontra no seu estado gasoso. O seu valor pode ser obtido a partir da (Eq. 3.2):

$$PCI = PCS - (m_w \times h_{fg,H_2O,T}) \text{ (kJ/kg}_{biomassa,bs}\text{)} \quad (Eq. 3.2)$$

onde,

$$m_w = w_{HR} \times \frac{18}{2} \text{ (kg H}_2\text{O/kg}_{biomassa,bs}\text{)} \quad (Eq. 3.3)$$

e, $h_{fg,H_2O,T}$ é a entalpia de vaporização da água à temperatura de referência.

4 Apresentação da Empresa *Ventil*

A empresa *VENTIL – Engenharia do Ambiente, Lda*, fundada em 1971, desenvolve entre outros, sistemas de produção de energia térmica (água quente) a partir de biomassa, ou seja, caldeiras a biomassa para potências térmicas nominais (P_{th}) entre $350 kW_{th}$ ($300.000 kcal/h$) e $7.000 kW_{th}$ ($6.000.000 kcal/h$). A empresa inclui cerca de 80 empregados, dos quais, cerca de 55 pertencem à produção e montagem. No ano 2013, a faturação da empresa foi de 4.500.000 €, tendo 42% sido obtidos a partir de mercados externos.

Em 2013, o consumo da empresa rondou os 50 tep. Portanto, a empresa não se encontra abrangida pelo programa do *SGCIE* (não é obrigatório), sendo que ainda assim poderia optar pela sua inserção de forma voluntária. De acordo com a *ENE 2020*, a *Ventil* revê-se nas medidas enunciadas, principalmente pela aposta em equipamentos para utilização de energia de fonte renovável (biomassa), pela promoção da eficiência energética e pela procura da sustentabilidade ambiental.

4.1 Descrição das caldeiras *Ventil*

As caldeiras *Ventil* produzem energia térmica na forma de água líquida quente, a partir da combustão direta de combustíveis sólidos derivados da biomassa (estilha, serrim, casca ou pellets), para utilização em processos de secagem ou aquecimento de espaços através do seu permutador de calor ar-água. Devido ao elevado nível e qualidade na sua construção, estas caldeiras adquirem um formato robusto, com a garantia de um excelente funcionamento e durabilidade, Figura 4.1.

Segundo (*Almeida, 2010*), de acordo com as restantes tecnologias do setor energético, a viabilidade das caldeiras *Ventil* está condicionada pelas suas condições de operação, dos combustíveis utilizados, do correto dimensionamento dos seus componentes, do controlo das condições de operação e tratamento dos efluentes gasosos.



Figura 4.1 - Caldeira Ventil.

De seguida, será apresentado o sistema de uma caldeira vertical (modelo CVT), do tipo ‘tubos de fumos’. Será feita uma abordagem geral aos equipamentos constituintes da caldeira, e aos vários dispositivos associados, que permitem um controlo permanente, e que garante uma combustão otimizada do combustível. Assim, o processo de valorização energética da biomassa é gerido pelo próprio sistema, desde o seu armazenamento, transporte, processo de combustão, até à distribuição de energia térmica. Na Figura 4.2, está representada de forma sequencial do processo todos os elementos constituintes do sistema.

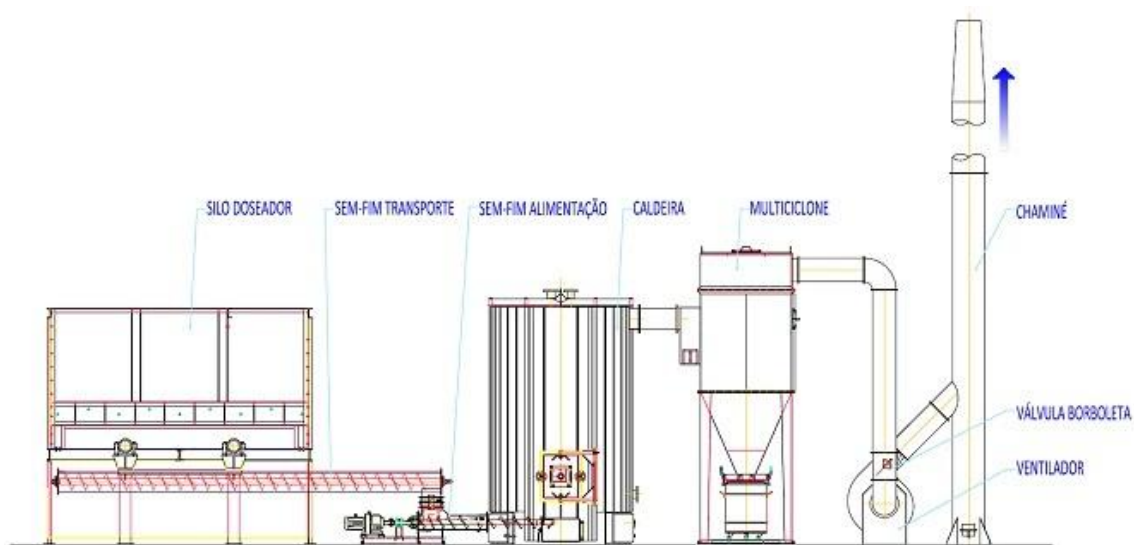


Figura 4.2 - Lay-out de um sistema Ventil, para de produção de energia térmica, a partir da biomassa.

4.1.1 Silo

O silo tem a função de armazenar a biomassa. De acordo com o tipo de material a armazenar, o silo pode ter a forma de um cone, o qual será mais indicado para armazenar pellets, ou então, pode ter uma base horizontal com fundo móvel, indicado para o armazenamento dos tipos de material com granulometrias mais irregulares (Almeida, J. & Tavares, C., 2013). O projeto do silo deve ter em conta a regularidade com que se pretende abastecer a biomassa.



Figura 4.3 - Silo com fundo móvel.

4.1.2 Sistema de transporte por sem-fim

O sem-fim de transporte é o elemento que fará a deslocação da biomassa entre o silo e a válvula rotativa. Este componente pode estar disposto na horizontal ou na diagonal, segundo o posicionamento dos equipamentos adjacente. Na Figura 4.4 pode ver-se a parte de trás deste componente, o qual desloca o material de um nível inferior.

4.1.3 Válvula rotativa ou válvula hidráulica

Antes que o material transportado pelo sem-fim de transporte seja depositado no sem-fim de alimentação, este passará previamente por uma válvula rotativa, Figura 4.4. Esta tem a função de criar condições mais estanques no transporte da biomassa e impedir retornos de chama.

4.1.4 Sistema de alimentação por sem-fim

O sem-fim de alimentação (acoplado à parte inferior da caldeira), Figura 4.4, permite transportar a biomassa em direção ao leito. Este método, além de permitir que a introdução de material seja feita de uma forma gradual, garante o controlo do processo

de combustão, e permite que o material sofra uma secagem prévia à medida que fica mais próximo da fornalha (Almeida, J. & Tavares, C., 2013).

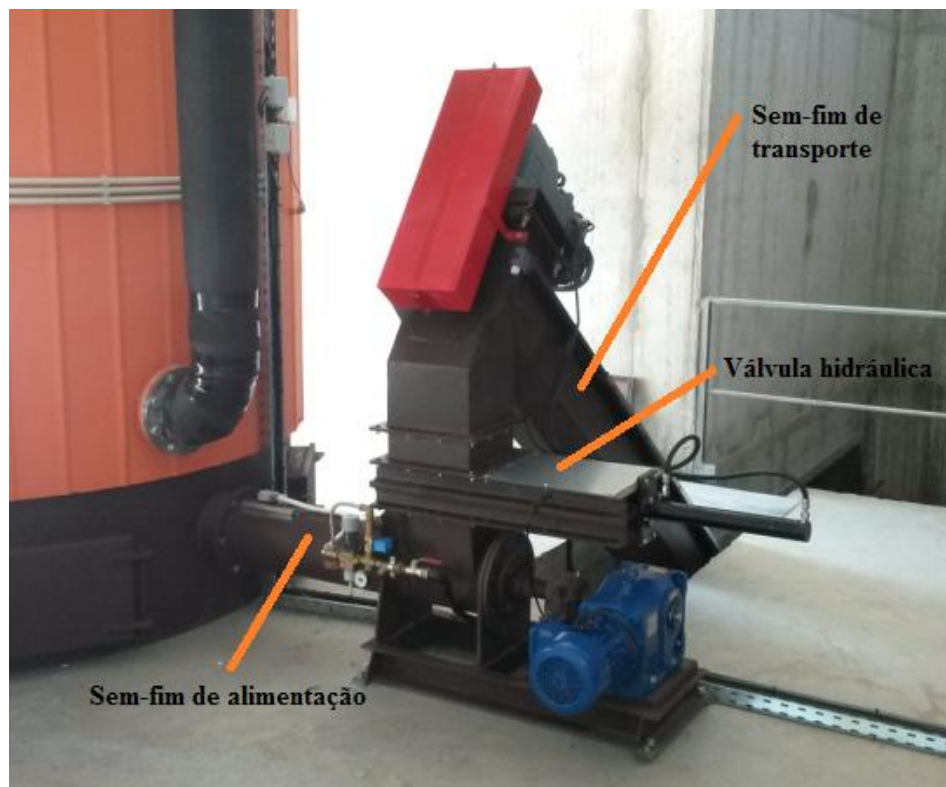


Figura 4.4 - Sem-fim de transporte, válvula hidráulica e sem-fim de alimentação.

4.1.5 Caldeira

A caldeira é o principal constituinte do sistema. Por sua vez, esta é constituída pela fornalha e pelo permutador de calor, Figura 4.1.

4.1.5.1 Fornalha

A fornalha, Figura 4.5, é o local onde ocorre a combustão do material anteriormente transportado pelo sem-fim de alimentação. Através de dois ventiladores de insuflação situados no exterior da caldeira é introduzido o ar de combustão, através de uma grelha circular fixa (ar primário) e através de entradas acima do leito de combustão (ar secundário), criando as condições ideais de alta temperatura, mistura e tempo de residência para um processo de combustão completa, eficiente e de reduzida emissão de poluentes (Almeida, J. & Tavares, C., 2013). Toda a fornalha é revestida por uma estrutura de betão refratário, maximizando a temperatura do seu interior e protegendo a estrutura de metálica da caldeira das temperaturas de operação (850 a 900°C).



Figura 4.5 - Fornalha no interior da caldeira.

4.1.5.2 Permutador de calor

Quanto ao permutador de calor, Figura 4.6, encontra-se do lado exterior à fornalha, rodeando toda a câmara de combustão. A elevada energia térmica de que os gases de combustão são portadores, irá ser utilizada para o aquecimento de água. Esses gases percorrem o interior de um elevado número de tubos sendo que no exterior dos quais circula a água da caldeira. Os gases percorrem um triplo trajeto através do permutador, o que permite uma elevada transferência de calor e eficiência térmica ao sistema (Almeida, J. & Tavares, C., 2013).



Figura 4.6 - Permutador de calor de uma caldeira.

4.1.6 Multiciclone

Após os gases terem efetuado o seu trajeto no interior da caldeira, estes chegam ao multiciclone mais frios. O multiciclone, Figura 4.7, é composto por vários ciclones, com

a finalidade de impedir que as partículas arrastadas pelos gases (cinzas volantes) se libertarem para a atmosfera. Os gases ao entrar no ciclone são induzidos a descrever uma trajetória espiral ao longo do seu corpo. Assim, as partículas ao embaterem nas paredes, perdem a sua energia cinética, e deixam de acompanhar as linhas de corrente, acumulando-se no fundo do ciclone. Posteriormente, para haver a libertação dos gases, estes invertem o seu movimento em direção à conduta de saída, sendo que, se deslocam pela parte interior do ciclone. Este processo permite aumentar a eficiência da separação de partículas.



Figura 4.7 - Multiciclone de um sistema.

4.1.7 Ventilador de exaustão

Este equipamento de ventilação permite que todo o sistema se mantenha a um nível de depressão constante, minimizando assim o risco de retorno da chama ou de gases quentes através dos equipamentos (*Almeida, J. & Tavares, C., 2013*). O ventilador de exaustão, Figura 4.8, auxilia também no processo de exaustão dos gases. Através de uma válvula borboleta instalada a montante do ventilador, é possível controlar a pressão no interior da fornalha, pelo seu ajuste de abertura ou fecho. Esta componente pode ser operada manualmente ou de forma motorizada automática.



Figura 4.8 - Ventilador de exaustão e chaminé.

4.1.8 Chaminé

A chaminé é o último componente de todo o sistema. Após a circulação dos gases pela caldeira e multiciclone, estes serão expulsos a partir da chaminé, sob ação do ventilador de exaustão. Na Figura 4.8, pode ver-se a conduta que conduz os gases para o exterior.

4.2 Descrição da caldeira em estudo

A caldeira em estudo, fabricada pela *Ventil*, pertence a uma empresa do sector agroalimentar situada na região centro do país. Esta empresa tem uma atuação diversificada, desde a criação de galinhas reprodutoras, passando pela produção de ovos, pela respetiva incubação e produção de pintos, à produção avícola de frangos, assim como ao seu abate e transformação.

A energia térmica produzida pela caldeira é necessária para o aquecimento de quatro pavilhões com sensivelmente 1600 m² cada um, na condição de proporcionar as condições favoráveis à criação de pintos.

A criação de uma ninhada de pintos demora sensivelmente 28 dias. Contudo, a necessidade de aquecimento de um pavilhão varia consoante o período de crescimento

dos animais. Desta forma, com base em informação do que é a prática corrente nestas instalações, assumiu-se que:

- ✓ Na 1ª semana – caldeira funciona 12 horas por dia
- ✓ Na 2ª semana – caldeira funciona 8 horas por dia
- ✓ Na 3ª semana – caldeira funciona 6 horas por dia
- ✓ Na 4ª semana – caldeira funciona 4 horas por dia

Considerando que a empresa produz uma ninhada por pavilhão a cada 28 dias, durante todos os meses do ano, o número de horas de funcionamento da caldeira será de 2520 horas. No entanto, considerando outros fatores, como as noites e dias mais rigorosos de inverno, as menores necessidades de calor nos dias de verão, e uma eventual diferença entre os períodos de crescimento das ninhadas pelos 4 pavilhões, exigindo um funcionamento mais constante da caldeira, definiu-se um período de operação anual de 3000 horas.

A Figura 4.9, representa esquematicamente o sistema de produção de energia térmica responsável pelo aquecimento dos pavilhões na empresa. A caldeira envolvida no sistema tem uma potência nominal de 2.325 kW_{th} ou $2.000.000\text{ kcal/h}$. Este valor representa a potência da água quente que é possível produzir.

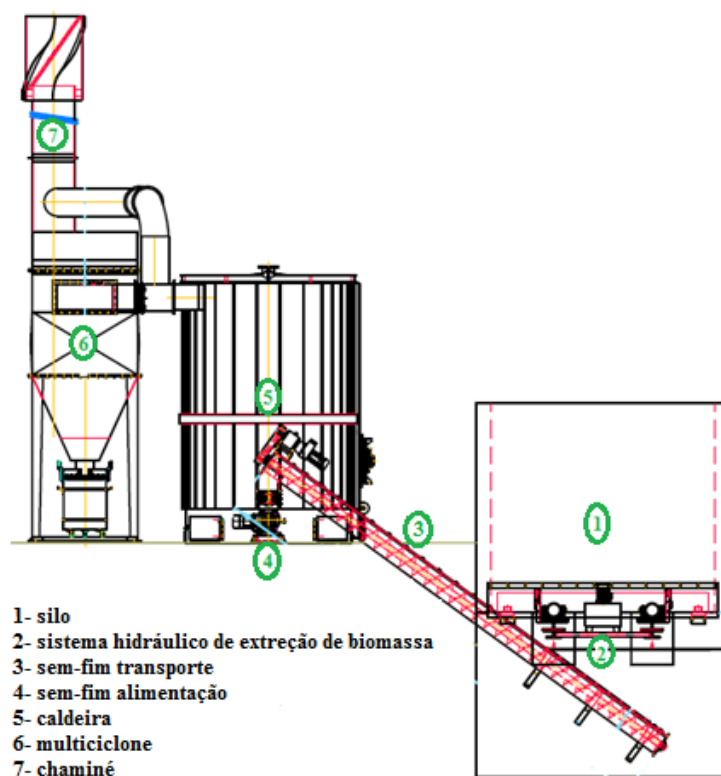


Figura 4.9 - Lay-out do sistema de produção de energia térmica em estudo.

O funcionamento deste sistema não vai muito além da descrição feita anteriormente. Contudo, será feita uma revisão do seu funcionamento e do posicionamento dos equipamentos elétricos associados.

O silo deste sistema tem uma base horizontal com fundo móvel. Associado a este componente, existe um motor cuja função é criar pressão dentro de um circuito hidráulico, fazendo movimentar o extrator de material. Com o trabalho deste motor e do circuito hidráulico, o material desloca-se sobre a base móvel do silo, caindo no sem-fim de transporte localizado abaixo.

Este sem-fim, acionado por um motoredutor, encontra-se exposto com uma inclinação de 36° , transportando o combustível desde um nível inferior até ao sem-fim de alimentação. Entretanto, o combustível passa pela válvula rotativa antes de ser deslocado pelo sem-fim de alimentação. Por sua vez, este sem-fim acionado por outro motoredutor introduz a biomassa no interior da fornalha.

O período de funcionamento do sistema de alimentação associado à fornalha pode não apresentar um regime de trabalho constante, sendo controlado pela necessidade energética do sistema (temperatura da água à saída da caldeira).

Na fornalha dá-se a queima do combustível, transformando a energia química que este contém em energia térmica. O processo de combustão é auxiliado pela entrada de ar primário e secundário. O ar primário é introduzido pela grelha circular fixa da fornalha, enquanto que o ar secundário é introduzido por entradas acima do leito de combustão. O ar é introduzido por dois ventiladores independentes, de forma a maximizar a mistura a esses níveis e assim, obter um eficiente processo de combustão. Na paragem do sistema, os ventiladores também param. No entanto existem sempre um pequeno caudal de ar a ser introduzido na caldeira de forma a que a chama não se apague.

A energia convertida pela combustão segue na forma de gases a elevadas temperaturas, deixando a fornalha no cimo da caldeira e entrando em numerosos tubos que na sua parte exterior estão em contacto com a água. As várias viagens que os gases quentes efetuam dentro dos tubos, transferem energia para a água, aquecendo-a.

A temperatura máxima de circulação da água no permutador é de 110°C , à pressão de 3 bar, limitada pela existência de válvulas e mecanismos de segurança. Os dados de

temperatura e pressão são permanentemente monitorizados por um termostato e um pressostato, situados no topo da caldeira, Figura 4.10.



Figura 4.10 - Locais de monitorização da temperatura e pressão.

Assim que os gases (mais frios) deixam a caldeira, vão percorrer condutas que os leva até ao multiciclone, onde as cinzas volantes arrastadas juntamente com os gases, são separadas e depositadas no seu fundo. Os gases, por ação de um ventilador de exaustão, irão ser conduzidos à chaminé. Este ventilador causa um nível de depressão constante, anulando o risco de retorno de chamas e gases.

A energia útil obtida pelo permutador de calor (água quente), será distribuída pelos pavilhões que se pretendem aquecer, através de uma rede de condutas apropriadas para esse efeito. A água circula constantemente entre a caldeira e os pavilhões, até entrar novamente na caldeira, submetendo-se a um novo aquecimento. A circulação da água pelas condutas é realizada por 8 bombas, as quais têm um funcionamento independente do restante sistema, uma vez que são controladas pela necessidade de aquecimento dos pavilhões.

Durante o período em que a caldeira esteve a funcionar, foram produzidos cerca de 90 m^3 de água quente por hora, a uma temperatura de $82,5^\circ\text{C}$, à pressão de 3 bar. Estas condições de operação variam de sistema para sistema, consoante a necessidade de aquecimento.

4.3 Equipamentos e sistemas de segurança

As caldeiras *Ventil* são caracterizadas pela elevada segurança de operação dos seus vários componentes. Todo o processo de funcionamento do sistema é comandado, regulado e controlado a partir de um quadro elétrico, que centraliza todos os sistemas mecânicos, elétricos e de segurança.

Segundo o *Manual de Instruções, Manutenção e Operação dos Sistemas Ventil*, os equipamentos de segurança associados ao sistema, fazem controlo do processo segundo vários fatores.

1. Controlo no circuito de biomassa

- ✓ Dispositivo de fim de curso do sem-fim de transporte – este dispositivo deteta um eventual encravamento ou a acumulação excessiva de material no sem-fim de transporte. Assim que acionado, dá-se ativação do alarme e paragem do sistema.
- ✓ Dispositivo de deteção e extinção de incêndio do sem-fim de alimentação – este dispositivo deteta um aumento da temperatura nas paredes do sem-fim de alimentação. Assim que acionado, dá-se a introdução de água no interior do sem-fim de forma a prevenir ou extinguir um eventual incêndio.

2. Controlo no circuito de água

- ✓ Sonda de temperatura – Este dispositivo faz uma monitorização constante da temperatura da água no interior da caldeira, transmitindo essa informação ao quadro de comando e controlo do sistema.
- ✓ Termostato de segurança – Este dispositivo sinaliza que a temperatura máxima definida para a água (110 °C) terá sido atingida. Neste caso, dá-se a sinalização do alarme e a imediata paragem do sistema.
- ✓ Pressostato de segurança – Este dispositivo indica que se atingiu a pressão mínima definida para a água (0,5 bar) e a consequente falta de água no interior da caldeira. Assim, será dado o alarme e dar-se-á a paragem do sistema.

3. Controlo da pressão na fornalha

- ✓ Sensor de pressão na fornalha – Este dispositivo permite fazer uma monitorização contante da pressão no interior da fornalha. Essa informação é transmitida ao quadro de comando e controlo do sistema, de forma a que a depressão causada pelo ventilador de exaustão seja constante.
- ✓ Servo-motor de regulação – Este dispositivo está associado à válvula borboleta do sistema. Ao receber informação da pressão no interior da fornalha, haverá um ajuste contínuo de abertura da válvula borboleta, aumentando ou diminuindo a pressão no interior da fornalha, de forma a torna-la aproximadamente constante.

4. Controlo na abertura da porta da caldeira

- ✓ Dispositivo de fim de curso na porta da caldeira – Este dispositivo sinaliza a abertura da porta da caldeira, dando-se a imediata paragem de introdução do combustível e ar para o interior da fornalha. No entanto, o ventilador de exaustão mantém o seu funcionamento de forma a que a depressão causada no interior da fornalha impeça que a chama saia pela porta.

5 Fundamentos teóricos

5.1 Conceitos elétricos

Toda a matéria que constitui o nosso universo é formada por átomos. A estrutura dos átomos tem vindo a ser reformulada ao longo da história, até que Heisenberg e Schrodinger definiram o ‘modelo da nuvem eletrónica’, revogando o sucesso da teoria anterior, conhecida por ‘modelo de Bohr’.

Na Figura 5.1 está representada a nuvem eletrónica de um átomo, a qual é constituída por um núcleo, e por eletrões que giram ao seu redor. O núcleo é constituído por dois tipos de partículas: os prótons, com carga positiva, e pelos neutrões, eletricamente neutros. Por sua vez, os eletrões possuem carga negativa. Logo, entre os prótons (+) e os eletrões (-) existe uma interação de atração mútua, devido às suas cargas opostas.

Portanto, a nuvem representa a distribuição da densidade eletrónica à volta do núcleo do átomo, sendo que, esta densidade dá a probabilidade dos eletrões poderem ser encontrados numa determinada região do átomo, ocupando determinados níveis de energia consoante a sua distribuição estiver mais perto do núcleo (*Chang, 1994*).

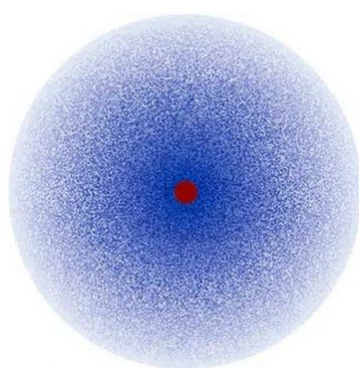


Figura 5.1 - Modelo de um átomo.

Um fio de cobre tem milhões de átomos carregados de eletrões¹². Portanto, se os terminais desse fio forem submetidos a uma diferença de potencial, os eletrões (–)

¹² Cada átomo de cobre tem 29⁺ eletrões.

serão atraídos pelo polo positivo e repelidos pelo negativo, garantindo que o seu movimento seja ordenado e na mesma direção. A este movimento dá-se o nome de corrente elétrica (I), e a sua intensidade A (Ampère), reflete-se na quantidade de elétrons que fluem através de um condutor, durante um intervalo de tempo (CPN, 2005).

Contudo, para que haja corrente elétrica é necessária algum tipo de força aplicada nos terminais do condutor. A esta pressão elétrica dá-se o nome de tensão ou diferença de potencial (V) e a sua unidade é o V (Volt).

Estes conceitos podem relacionar-se através da *Lei de Ohm*, a qual afirma que os valores de tensão, corrente e resistência estão relacionados entre si, tal que:

$$R = \frac{V}{I} \quad (\Omega) \quad (Eq. 5.1)$$

em que, R é a resistência elétrica de um circuito, considerada como uma oposição à passagem de corrente elétrica. A sua unidade é o Ohm (Ω).

5.2 Corrente contínua e corrente alternada

5.2.1 Corrente contínua

Ao ser aplicada uma tensão a um material condutor, dá-se o movimento de cargas elétricas. Um condutor é um material imperfeito, com uma certa resistividade, a qual, quanto maior, mais dificulta a passagem de carga elétrica. Assim, a corrente apresenta uma velocidade continua, nunca alterando o seu sentido (é sempre positiva ou negativa) ao longo do tempo, sendo por isso chamada de corrente continua (DC).

Ao ligar uma máquina elétrica à fonte, irá haver produção de trabalho. Logo, quando é fornecida uma tensão a uma resistência, gerar-se-á uma corrente, tendo todos estes parâmetros influência no valor da potência elétrica quando se trabalha em corrente contínua. Este valor pode ser obtido através da equação 5.2.

$$P = V \times I \quad [W] \quad (Eq. 5.2)$$

Desenvolvendo a (Eq. 5.2) para $P = RI^2$, esta demonstra a potência dissipada por efeito de Joule e, expressa a relação entre a resistência de um condutor e a corrente elétrica que o atravessa. Uma parte dessa corrente será transformada em trabalho, sendo que a outra parte transformar-se-á em calor. Uma vez que o quadrado da corrente se

relaciona diretamente com o valor da resistência de um material, quanto maior for a corrente, maiores serão as perdas por efeito de Joule.

5.2.2 Corrente alternada

A energia elétrica que mais se utiliza é gerada em corrente alternada (AC), o que possibilita a uma geração em larga escala e baixo custo. Este é o tipo de corrente que se pode encontrar na rede elétrica residencial, pública ou industrial, podendo ser distribuída por elevadas distâncias.

Esta corrente obtém-se a partir de alternadores, e caracteriza-se pelo facto de que a tensão em vez de permanecer constante, variar no tempo, mudando o seu sentido alternadamente.

Portanto, as funções alternadas sinusoidais são importantes para análise de circuitos, pois, a maior parte dos sistemas de produção e distribuição elétrica, gera e transmite energia através de grandezas cuja evolução no tempo pode ser considerada sinusoidal. A (Eq. 5.3) descreve uma grandeza alternada sinusoidal.

$$\psi(x, t) = A(V, I) \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (\text{Eq. 5.3})$$

sendo que, A é a amplitude da onda de V ou I , atingindo esta um máximo positivo e outro negativo em cada ciclo. $(\omega t + \varphi)$ é a fase da onda, em que ω ($\omega = 2\pi f$) é a frequência angular (rad/s) e φ é a fase inicial (rad). A Figura 5.2 representa graficamente uma grandeza sinusoidal.

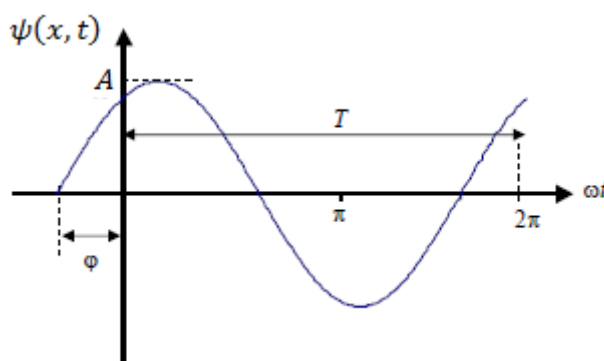


Figura 5.2 - Representação de uma grandeza sinusoidal.

Cada meia onda positiva e meia onda negativa criam um ciclo. O número de ciclos por segundo é a frequência [$f(\text{Hz})$] da grandeza alternada, tal que $f = 1/T$, sendo T o período da função, em segundos (s).

Em Portugal, a frequência da rede elétrica é de 50 Hz. Assim, pode afirmar-se que no espaço de 1 segundo existem 50 ciclos, ou seja, o sentido da corrente ou da tensão altera por 100 vezes por segundo. Por sua vez, o período de cada ciclo será igual a 0,02 segundos.

Valor Eficaz

Ao considerar uma resistência inserida num sistema monofásico, à qual se aplica uma tensão alternada sinusoidal, o calor por ela desenvolvido ao longo do tempo, é o mesmo para uma corrente alternada sinusoidal ou unidirecional, conforme mostra a Figura 5.3 b) e c).

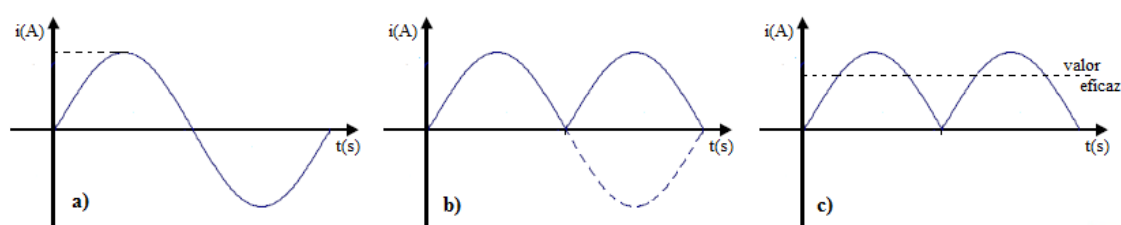


Figura 5.3 - Valor eficaz de uma corrente alternada sinusoidal.

Então, pode afirmar-se que uma corrente continua produz o mesmo calor de uma corrente unidirecional durante o mesmo tempo. Este valor designa-se por valor eficaz.

O valor eficaz de uma corrente alternada é a intensidade de uma corrente continua, que nas mesmas condições (mesma resistência e tempo) produz o mesmo efeito calorífico do que uma corrente alternada (Rodrigues, 1991). Na (Eq. 5.4) e (Eq. 5.5), tem-se o valor eficaz da corrente e tensão, sendo este valor $\sqrt{2}$ menor do que o seu valor máximo.

$$I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = 0,707 I_{max} \quad (Eq. 5.4)$$

$$V = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = 0,707 V_{max} \quad (Eq. 5.5)$$

Portanto, quando se indica um valor não especificado de uma corrente ou tensão, consideram-se como sendo o seu valor eficaz.

5.3 Sistema trifásico alternado

O sistema trifásico é a forma mais comum para a produção, distribuição e consumo de energia elétrica. A partir de um alternador é possível transformar a energia mecânica em energia elétrica, sendo que este apresenta no estator três enrolamentos independentes (bobinas), deslocados entre si por 120° . Na Figura 5.4 está a representação esquemática de um alternador deste tipo.

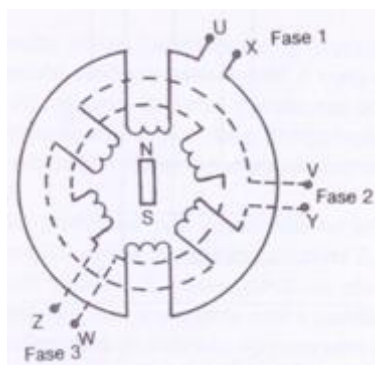


Figura 5.4 - Representação esquemática de um alternador trifásico (Matias, 1994).

A partir de que o rotor inicia o seu deslocamento, só passados 120° é que o mesmo polo se encontra de frente ao enrolamento seguinte, e assim sucessivamente até chegar ao ponto de partida.

Cada uma das bobinas existentes no alternador gera energia através da indução eletromagnética, sendo que a cada uma dessas bobinas dá o nome de fase (CPN, 2005), Figura 5.5.

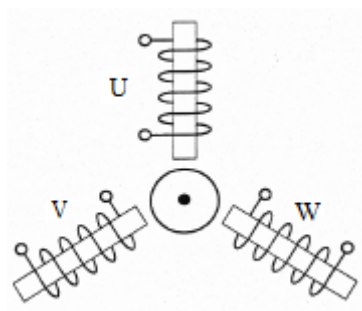


Figura 5.5 - Bobinas U,V,W.

Dado à posição das bobinas, a geração ocorre em momentos distintos, provocando um desfasamento entre as tensões geradas. Tem-se então três tensões iguais e desfasadas entre si 120° , ou seja, $1/3$ do período (CPN, 2005). Na Figura 5.6 está

representado o diagrama temporal de um sistema trifásico, onde os três vetores girantes com a mesma velocidade angular, estão associados às respectivas tensões geradas.

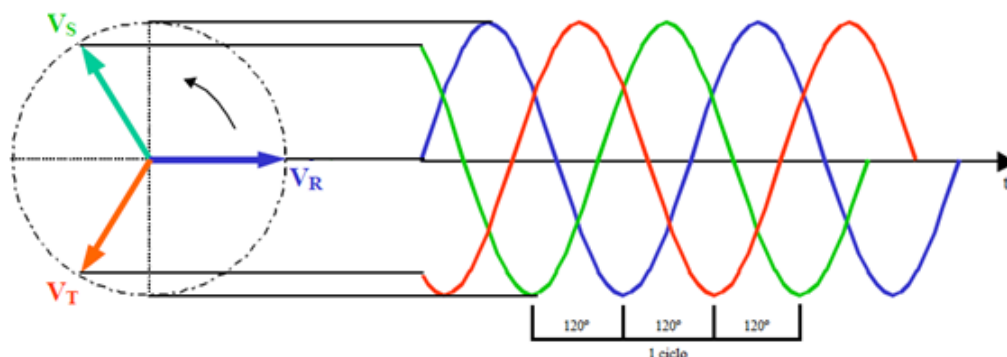


Figura 5.6 - Representação temporal de um sistema trifásico de tensões (Paiva).

Estas grandezas podem ser representadas matematicamente por:

$$V_R = V \cdot \sin(\omega t)$$

$$V_S = V \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_T = V \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)$$

As três fases do alternador podem alimentar separadamente três cargas diferentes e independentes. No entanto, este não é o tipo de alimentação mais aconselhável, pois torna dispendiosa a sua instalação, uma vez que são necessários seis condutores diferentes para alimentar as cargas (Matias, 1994).

Então, existem outros processos de alimentação trifásica das cargas, em que os enrolamentos do alternador se podem ligar: em estrela ou triângulo, reduzindo o número de condutores necessários.

5.3.1 Ligação em estrela

A ligação em estrela é bastante utilizada na distribuição de energia. Como se verifica pela Figura 5.7, as extremidades de cada fase estão ligadas a um ponto comum, denominado neutro, o qual está ligado à terra. Portanto, diz-se que um circuito está ligado em estrela, quando as cargas estão ligadas entre as fases e o neutro.

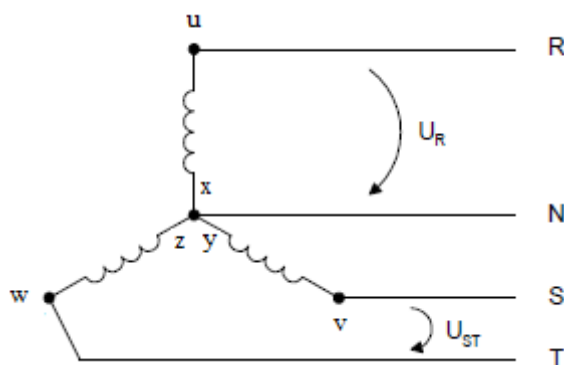


Figura 5.7 - Ligação em estrela com representação das tensões simples e compostas (Alves, 1999).

Num sistema trifásico, podem ser definidas dois tipos de tensão: tensão simples (U_s) e tensão composta (U_c).

- ✓ A tensão simples, ou tensão de fase, pode ser definida como a tensão existente entre um condutor de fase e o condutor neutro. Estas tensões são representadas por: U_R , U_S e U_T . Nas redes de distribuição de baixa tensão, esta tensão é de aproximadamente 230V (Alves, 1999).
- ✓ A tensão composta, ou tensão entre fases, define-se como uma tensão existente entre dois quaisquer condutores de fase, como por exemplo, U_{ST} . Nas redes de distribuição de baixa tensão, esta é aproximadamente de 400V (Alves, 1999).

A relação entre ambas as tensões é dada por $U_c = \sqrt{3} U_s$. Assim, claramente se entende que a tensão composta é $\sqrt{3}$ vezes superior à tensão simples. Daí, considerando que a tensão simples é de 230V, então a tensão composta será de 400V.

5.3.2 Ligação em triângulo

Na Figura 5.8 está representado o esquema de uma ligação em triângulo nos enrolamentos de um estator. É perceptível que o final de cada enrolamento se liga ao princípio do enrolamento seguinte, formando assim um triângulo. Cada uma das três uniões dos enrolamentos está ligada ao circuito exterior, através de três condutores de fase.

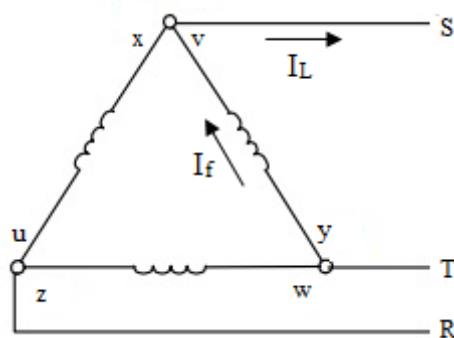


Figura 5.8 - Ligação em triângulo.

Numa ligação em triângulo, a tensão composta será igual à tensão simples. No entanto, a corrente em cada fio condutor, como por exemplo em I_L , será igual a $\sqrt{3}$ vezes a corrente que percorre cada enrolamento I_f (Matias, 1994).

5.4 Potência num sistema trifásico

No sistema trifásico, a potência de cada fase da carga será igual a $P = V.I$ [W], como se fossem um sistema monofásico independente. Então, a potência total será a soma das potências das três fases:

$$P = 3 \times V.I \quad [W] \quad (Eq. 5.6)$$

Sabendo que o sistema trifásico é ligado através de ligações em estrela ou triângulo, no caso de se ter uma carga resistiva, onde a tensão e a corrente estão em fase, o valor da potência será igual para ambas as ligações, como mostra a (Eq. 5.7).

$$P = \sqrt{3} \times V.I \quad [W] \quad (Eq. 5.7)$$

No entanto, no caso de haver uma carga reativa, onde existe desfasagem, como no caso dos motores de indução, esta desfasagem tem que ser levada em conta, sendo que o ângulo entre V e I é dado por $\cos \varphi$. Este parâmetro é conhecido por fator de potência.

$$P = \sqrt{3} \times V.I \cos \varphi \quad [W] \quad (Eq. 5.8)$$

Portanto, uma carga reativa pode surgir como carga indutiva ou carga capacitiva. Como carga indutiva pode dar-se o exemplo das bobinas existentes nos motores, as quais causam um desfasamento, entre a tensão e corrente, em que a corrente surge atrasada em relação à tensão. Por sua vez, um condensador é uma carga capacitiva, cujo desfasamento revela um avanço da corrente em relação à tensão (Albuquerque, 1993).

5.5 Motores elétricos

Um motor elétrico é uma máquina capaz de promover a transformação de energia elétrica em energia mecânica, mesmo que existam algumas perdas associadas. Como essas perdas são pequenas, o motor elétrico apresenta rendimentos energéticos muito elevados.

Pelo princípio da indução magnética, desenvolvido por Michael Faraday, foi possível desenvolver e construir o motor elétrico, pois, por de trás do processo de transformação de energia existe uma reação entre dois campos magnéticos.

Na *UE*, os sistemas acionados por motores elétricos são responsáveis por cerca de 70% do consumo de energia elétrica no Setor Industrial (*Almeida et al.*, 2005). Em Portugal, este valor é superior, representando os motores mais de 70% do consumo de eletricidade da indústria e cerca de 30% do consumo elétrico global do país (*ADENE*, 2010). A Figura 5.9 representa o consumo elétrico dos motores, relativamente à sua utilização na indústria portuguesa.

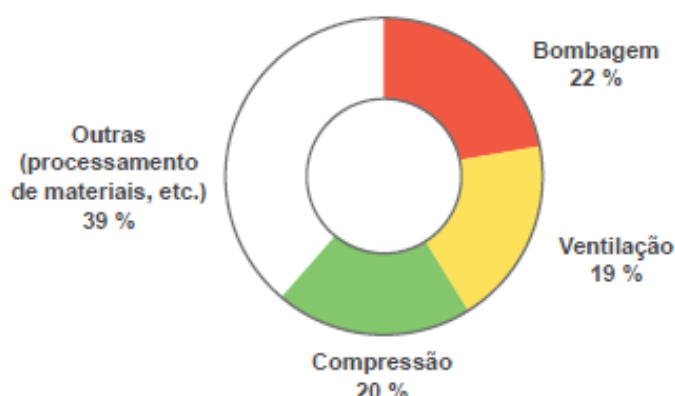


Figura 5.9 - Distribuição do consumo dos motores elétricos na Indústria Portuguesa
(*ADENE*, 2010).

Um motor pode ser classificado de acordo com o tipo de corrente com que é alimentado, ou seja, existem motores de corrente contínua ou de corrente alternada. Os motores elétricos alimentados por corrente alternada podem ser divididos em duas categorias: síncronos e assíncronos ou de indução, Figura 5.10.

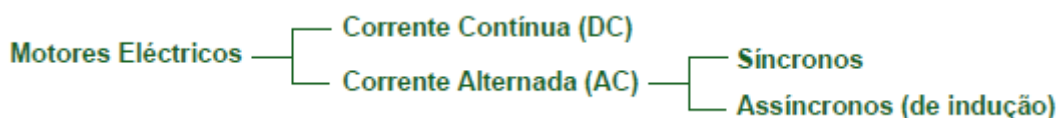


Figura 5.10 - Classe dos motores elétricos.

No presente caso de estudo, apenas serão estudados os motores de indução trifásicos. Estes motores são adequados para quase todo o tipo de acionamento de máquinas, funcionando normalmente a uma velocidade constante, a qual, varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Este é o tipo de motor mais utilizado pois revela muitas vantagens na utilização da energia elétrica, como o seu baixo custo, a facilidade de transporte, limpeza e a simplicidade no seu comando. Além disso, embora este tipo de motor tenha uma construção simples, apresenta uma elevada robustez e baixo custo (WEG, 2005).

Também se deve muito à utilização destes motores, ao facto da distribuição de energia elétrica na rede ser feita através de corrente alternada.

5.5.1 Constituição de um motor assíncrono

A constituição dos motores elétricos assíncronos não é muito elaborada, sendo compostos basicamente por duas partes: por um estator e por um rotor. O estator é o componente estático de um motor, enquanto que o rotor é a sua parte móvel. Na Figura 5.11 pode ver-se a constituição deste tipo de motores elétricos.

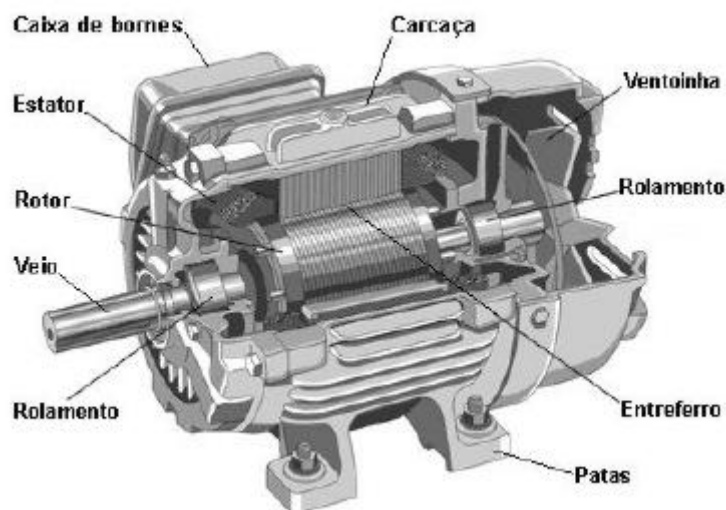


Figura 5.11 - Constituição de um motor (Francisco, 2006).

Como foi dito anteriormente, o estator é a componente fixa de um motor. Segundo (Francisco, 2006), a sua constituição baseia-se no empilhamento de várias chapas finas de aço magnético. Estas chapas tem uma forma circular e possuem ranhuras internas, nas quais são colocados os enrolamentos, que atravessados por uma corrente elétrica criam um campo magnético.

Por sua vez, o rotor é constituído por um núcleo de aço magnético igualmente formado pelo empilhamento de vários pedaços de aço laminados, em forma de anel. Sobre esse núcleo, podem encontrar-se aplicados um conjunto de rolamentos, formando um rotor bobinado, ou então, um conjunto de condutores em paralelo, formando um rotor em curto circuito ou em gaiola de esquilo. O rotor será apoiado no veio de rotação do motor, o qual, transmite toda a energia mecânica produzida à carga aplicada.

Este tipo de motores são chamados de máquinas assíncronas, pois o rotor gira com uma frequência diferente da frequência do campo girante do estator.

5.5.2 Princípio do funcionamento de um motor elétrico assíncrono

O estator de um motor de indução trifásico é formado por três bobinas colocadas de forma a que entre cada uma exista um ângulo de 120° . Estas bobinas, ao serem percorridas por uma corrente elétrica, criam um campo magnético girante perpendicular ao fluxo da corrente, o qual atravessa o rotor provocando uma variação no fluxo dos seus condutores.

Segundo a *Lei de Faraday*, sempre que numa superfície envolvida por um circuito houver uma variação de fluxo, gera-se nesse circuito uma força eletromotriz induzida (Matias, 1994). Portanto, quando o campo magnético atravessa o rotor, vai provocar uma variação no fluxo dos seus condutores. Uma vez que estes condutores estão em circuito fechado, serão percorridos por uma corrente induzida.

Então, de acordo com a *Lei de Lenz*, qualquer corrente induzida tem um sentido tal, que o campo magnético que ela gera opõem-se à variação do fluxo magnético que lhe deu origem (Matias, 1994). Assim, vai gerar-se um campo magnético no rotor, o qual tende a opor-se ao campo magnético girante do estator, pelo que, os dois campos deverão ter polos contrários.

Consequentemente, segundo a *Lei de Laplace*, um condutor ao ser percorrido por uma corrente elétrica, e estando envolvido por um campo magnético, fica sujeito a uma força eletromagnética, que o faz deslocar num determinado sentido (Matias, 1994). Então, como o campo do estator é girante, e, sabendo que dois polos contrários se atraem, o rotor entra em movimento, tentando acompanhar a rotação do campo girante.

5.5.3 Características dos motores elétricos

5.5.3.1 Velocidade síncrona (n_s)

Quando um conjunto de 3 bobinas é alimentado por um sistema trifásico de correntes de frequência f , criam-se campos girantes que rodam com uma dada velocidade n (Matias, 1994).

A velocidade com que o campo magnético do estator roda, vai definir a velocidade aplicada ao rotor, à qual se dá o nome de velocidade síncrona. Esta velocidade depende do número de pares de polos (p) do motor e da frequência [$f(\text{Hz})$] da rede. A quantidade de polos (sempre em número par, sendo um Norte e o outro Sul) depende da forma como estão dispostas as bobinas no estator do motor, e é determinado pela frequência de alimentação e pela velocidade desejada (Engelmann *et al.*, 1995).

Então, sabendo que em Portugal a frequência é de 50Hz, ou seja, o campo girante do estator efetua por segundo cerca de 50 voltas, a velocidade síncrona (*r.p.m.*) pode ser determinada através da equação 5.9.

$$n_s = \frac{f}{p} \times 60 = \frac{f}{2p} \times 120 \quad (\text{Eq. 5.9})$$

Portanto, facilmente se consegue saber a velocidade de sincronismo de motores com diferente número de polos. Na Tabela 5.1, pode ver-se que o aumento no número de polos num motor corresponde ao decréscimo da velocidade síncrona do mesmo.

Tabela 5.1 - Velocidade síncrona em função do número de polos de um motor elétrico.

Nº de polos	Velocidade síncrona ($f = 50\text{Hz}$)
2	3000
4	1500
6	1000
8	750
12	500

5.5.3.2 Deslizamento

A velocidade do rotor de um motor de indução não é igual à velocidade síncrona desse motor, ou seja, ao campo girante do estator. Ao se aplicar uma carga ao veio de um motor, a sua resposta imediata é de desacelerar, aumentando o deslizamento. Do mesmo modo, quando a carga é diminuída, a velocidade é mais elevada. Para a maioria

dos motores de indução, o deslizamento à carga nominal é inferior a 5% (Engelmann *et al.*, 1995).

Portanto, a diferença entre a velocidade do motor (n) e a velocidade síncrona (n_s), chama-se de deslizamento [$s(r.p.m.)$]. Esta grandeza pode exprimir-se através do seu valor relativo ou percentual, como mostra a (Eq. 5.10) e (Eq. 5.11), respetivamente.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [r.p.m.] \quad (Eq. 5.10)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad [\%] \quad (Eq. 5.11)$$

Quando um motor está a funcionar sem carga, o valor do deslizamento assume valores muito próximos de 0 ($n \approx n_s$).

5.5.3.3 Binário motor

O binário (M) é a medida do esforço necessário para girar um eixo. Podemos obter essa medida a partir do produto da força (F) que se aplica a uma carga, e a distância do braço (b), entre o centro de um eixo e o local onde se aplica a força.

$$M = F \times b \quad (Eq. 5.12)$$

No rotor de um motor, sempre que um condutor (de comprimento l), percorrido por uma corrente i (devido à f.e.m induzida E), for submetido a um campo magnético de indução B , exerce-se sobre ele uma força eletromagnética F que tende a deslocá-lo em determinado sentido.

$$F = B \cdot i \cdot l \quad (Eq. 5.13)$$

Portanto, se for colocado um conjunto de espiras igualmente desfasadas entre si no rotor, cada uma delas ficará submetida a um binário de forças, igualmente desfasados entre si, fazendo rodar o motor no sentido do campo girante (Matias, 1994).

Na Figura 5.12, pode verificar-se que se a cada instante forem somados os binários parciais (M_i), resulta num valor praticamente constante do binário total M ao longo do tempo, durante a rotação completa do motor, pelo que, quanto maior for o número de espiras, maior será o valor do binário e mais constante este será.

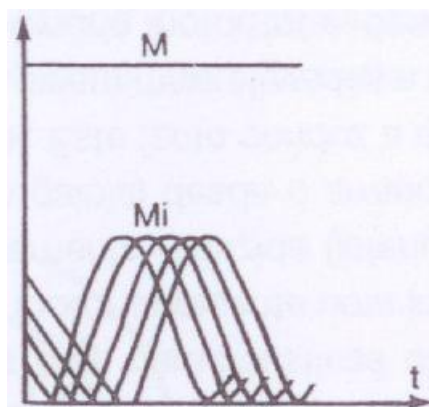


Figura 5.12 - Diagrama temporal dos binários parciais e total (Matias, 1994).

5.5.3.3.1 Curva Binário x Velocidade

Como já referido, o binário é a força necessária para fazer girar o eixo de um motor. No entanto, a produção do binário pode variar durante as várias fases de operação de um motor, Figura 5.13.

Segundo o binário resistente (carga acionada e atritos), e segundo as características de binário em relação à velocidade e corrente de arranque, a curva pode assumir diferentes aspetos. Contudo, esta curva representa a generalidade dos motores de indução com rotor em gaiola, que normalmente operam com ventiladores, bombas e outras cargas comuns.

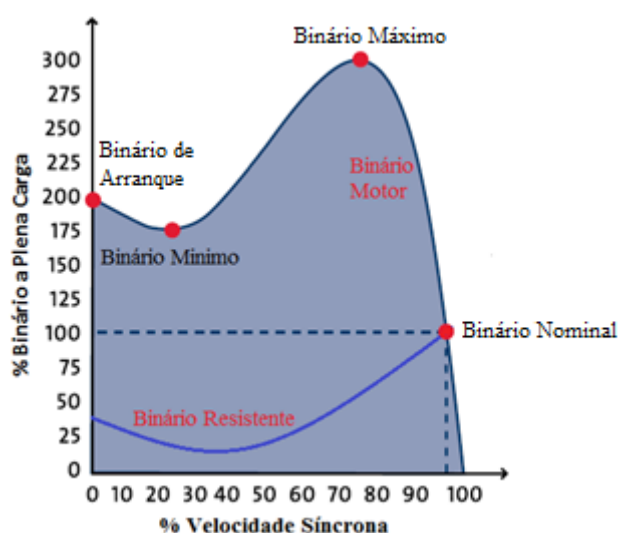


Figura 5.13 - Curva de binário x velocidade (Grundfos, 2004).

No momento em que um motor está parado, ou seja, em que a sua velocidade é nula, e é energizado pela aplicação de uma tensão, é produzido o seu binário de arranque.

Nesta etapa, independentemente da carga aplicada ao motor, o valor da corrente de arranque atinge valores pelo menos 6 vezes superiores ao seu valor nominal, pois, como o motor está parado, é necessário um maior binário para superar a inércia no rotor (Matias, 1994).

Assim que a velocidade do motor começa a evoluir em direção à sua velocidade nominal, a corrente tende a diminuir, e o binário motor até atingir o seu ponto de funcionamento irá registar um valor mínimo e um valor máximo.

Quando o motor atinge valores próximos aos 20% da sua velocidade síncrona, regista-se o ponto mais baixo da curva, denominado por binário mínimo. Posteriormente, para velocidades superiores, o binário começa a crescer até ser atingido o binário máximo, atingindo-se a quantidade máxima de binário que um motor pode fornecer. Portanto, na ocorrência de sobrecargas, o binário pode variar entre os 200% e os 300% do binário a plena carga.

Logo após se ter atingido o binário máximo, o binário diminui até atingir o ponto de funcionamento. Então, o binário motor iguala o binário resistente, chegando-se ao binário nominal da máquina, sendo que os valores de velocidade e corrente também estabilizam neste ponto. No entanto, este ponto de funcionamento depende do regime de carga, pelo que podem ocorrer variações do ponto onde se atinge o binário nominal.

5.5.3.4 Fator de potência

Num circuito de corrente alternada com presença de resistências, as ondas de tensão e corrente apresentam-se em fase, mudando a sua polaridade no mesmo instante a cada ciclo.

No entanto, num motor de indução, está-se perante a existência de bobinas, as quais são cargas resistivas. O armazenamento de energia nas bobinas, resulta num desfasamento entre as ondas de tensão e corrente, resultando no surgimento do fator de potência (FP).

O FP indicado por $\cos \varphi$, em que φ é o ângulo de desfasagem entre a tensão e a corrente de uma grandeza sinusoidal, é a relação entre a potência real ativa (P), ou absorvida, e a potência aparente (S).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (Eq. 5.14)$$

Num sistema elétrico, existe também a potência reativa (Q), a qual está intimamente ligada à potência ativa e aparente, formando um triângulo, Figura 5.14, conhecido por triângulo das potências, sendo que:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (Eq. 5.15)$$

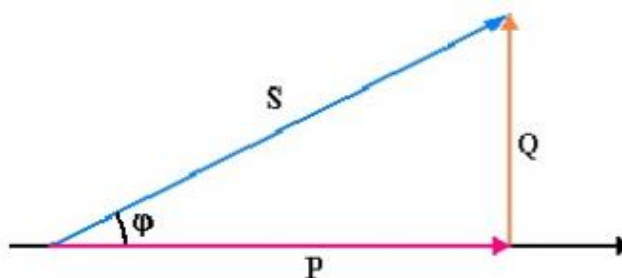


Figura 5.14 - Triângulo das potências.

A potência aparente é o resultado da multiplicação da tensão pela corrente ($S = V.I$) para sistemas monofásicos e ($S = \sqrt{3}.V.I$) para sistemas trifásicos. A unidade da potência aparente é portanto o Volt Ampère (VA).

A potência ativa é a parcela da potência aparente, com a capacidade para produzir trabalho, ou seja, que é transformada em energia. A potência ativa expressa-se em watt (W), e é dada pela equação 5.16.

$$P = \sqrt{3}.V.I.\cos\varphi \quad (Eq. 5.16)$$

Por último, a potência reativa é a parcela da potência aparente que não realiza trabalho. Esta é a medida de energia que foi armazenada e posteriormente depositada na fonte, contribuindo para a produção do campo elétrico e magnético necessários para o funcionamento do motor elétrico de indução. No entanto, esta componente deve ser minimizada, ou mesmo eliminada, de forma a fazer coincidir a potência aparente com a potência útil. A potência reativa expressa-se em Volt Ampère reativo (VAr).

$$Q = \sqrt{3}.V.I.\sin\varphi \quad (Eq. 5.17)$$

O FP de potência pode ter valores entre 0 e 1, devendo ser idealmente o mais alto possível. Como o valor a pagar a um fornecedor de energia está diretamente relacionado com a medida consumida da potência elétrica aparente, esta deverá estar o mais próxima possível da potência que um motor converte em trabalho útil (potência elétrica ativa).

5.5.3.4.1 Compensação do fator de potência

Dado que, todos os motores elétricos, têm um FP diferente de 1, o seu funcionamento leva a maiores contas de eletricidade, visto que a potência aparente é maior do que a potência útil.

Como um motor tem cargas indutivas, para ultrapassar o problema da potência reativa consumida, será necessária a criação de uma instalação elétrica, fornecedora de energia reativa através de condensadores, a qual se irá opor à energia reativa consumida pelos motores, conduzindo à situação desejada, em que a potência ativa seja igual à potência aparente.

É comum que a compensação seja feita de forma global centralizada, através de um quadro geral. Este equipamento, gere a potência reativa dos condensadores segundo a carga aplicada ao motor, obtendo em cada momento a ideal correção do FP .

5.5.3.5 Rendimento

Um motor elétrico absorve energia elétrica da rede, transformando-a em energia mecânica no eixo. O rendimento define a eficiência com que esta transformação é feita.

Segundo o departamento de energia dos *EUA*, a definição *NEMA* sobre eficiência energética de um motor, é a proporção da sua potência útil, para a entrada total de energia. Este valor é normalmente expresso em percentagem, assim como indica a (Eq. 5.18) (*US Department of Energy*):

$$\eta = \frac{P_{chapa} \times FC^{13}}{P_{medida}} \quad (Eq. 5.18)$$

Este valor pode igualmente ser calculado a partir da (Eq. 5.19), a qual realiza um ajuste entre a tensão (V_r) e corrente (I_r) teóricas e a tensão (V) e corrente (I) medidas (*Chirakalwasan, 2007*).

$$\eta = 1 - \frac{\left(\frac{1}{\eta_{teo}} - 1\right) * P_{chapa} * \left[0.3 * \left(\frac{V}{V_r}\right)^2 + 0.7 * \left(\frac{VI}{V_r I_r}\right)^2\right]}{P_{medida}} \quad (Eq. 5.19)$$

¹³ FC – Fator de Carga

Como se sabe, qualquer motor revela perdas no seu funcionamento. Caso contrário, estes poderiam apresentar rendimentos de 100%, o que não acontece. As perdas associadas aos motores elétricos são as seguintes, Figura 5.15 a):

- *Perdas por efeito de joule no estator e no rotor*: estas perdas devem-se principalmente à resistência dos enrolamentos.
- *Perdas no ferro do estator e do rotor*: estas perdas são devidas ao campo magnético. Dependem da densidade do fluxo, da frequência e da qualidade do material ferromagnético. Dividem-se em perdas por histerese ou perdas Foucault.
- *Perdas mecânicas*: estas perdas devem-se ao atrito dos enrolamentos e ao arrasto causado pelo ventilador acoplado ao eixo.
- *Perdas extravias*: estas perdas são devidas a fugas de fluxo, distribuição de corrente uniforme e a imperfeições mecânicas nas aberturas para o escoamento de ar.

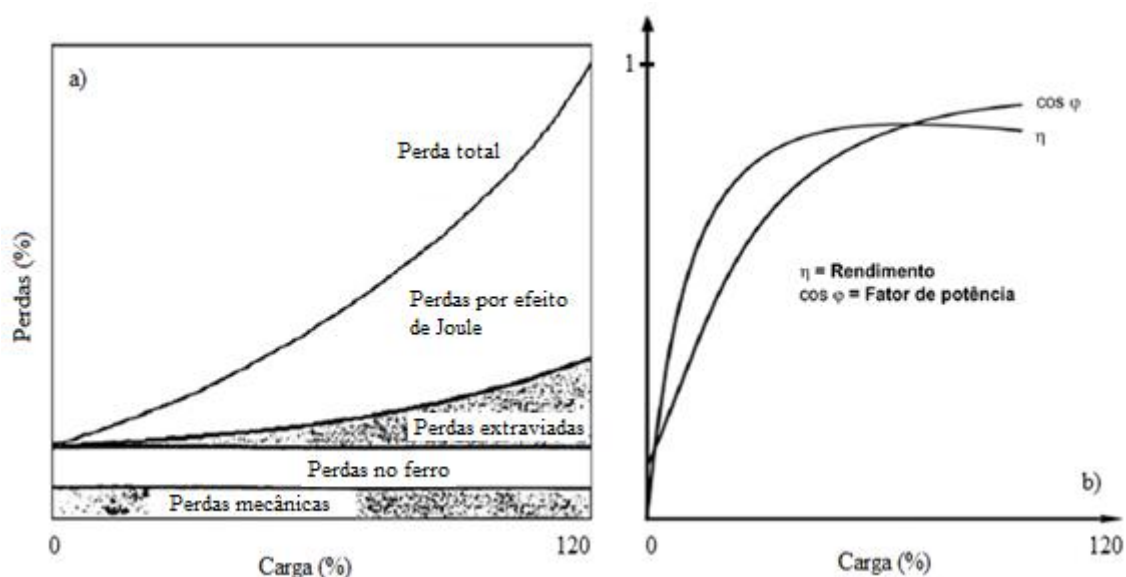


Figura 5.15 - a) Perdas de um motor em função da carga (Saidur, 2010); b) Rendimento e fator de potência em função da carga do motor.

Então, para o cálculo do rendimento deve ter-se em conta as perdas associadas no funcionamento de um motor. Assim, pela (Eq. 5.20) obtém-se o seu rendimento.

$$\eta = \frac{P_{ab} - \Sigma \text{perdas}}{P_{ab}} \quad (\text{Eq. 5.20})$$

5.5.3.6 Fator de carga

Devido a erros de projeto, ou a ações de segurança, é abundante o número de motores de indução encontrados cujo dimensionamento não se encontra adequado.

O fator de carga (FC) é um índice da operação mecânica de um motor. Por outro lado, é considerado como a média da carga aplicada a um motor ao longo do seu ciclo de operação. No entanto, este pode também ser encarado como um indicador de eficiência. O seu valor pode ser obtido pela (Eq. 5.21), ou seja, pela razão entre a potência mecânica ou potência real fornecida e a potência nominal da chapa (potência máxima que pode ser fornecida pelo motor).

$$FC = \frac{P_{mecânica} [kWh]}{P_{nominal} [kW \times t]} \quad (Eq. 5.21)$$

Segundo (Ferreira & de Almeida, 2012), na União Europeia a média do FC dos motores de indução trifásicos, com rotor de gaiola, é cerca de 60%. No entanto, em alguns setores industriais, uma parte destes motores opera com um FC tão baixo como os 25%. Por sua vez, segundo o Departamento de Energia dos EUA, 44% dos motores de instalações industriais operam com valores iguais ou inferiores a 40% da sua capacidade de carga total (Saidur, 2010).

5.5.3.7 Relação entre fator de carga com o rendimento e fator de potência

O rendimento e o fator de potência do motores de indução com rotor gaiola depende significativamente da carga aplicada, particularmente em motores de tamanho pequeno e médio, os quais na maioria dos casos atingem o seu pico de eficiência para cargas entre os 65% e os 90% (Ferreira & de Almeida, 2012).

Normalmente, os motores funcionam de forma mais eficiente quando operam com cargas acima dos 75% da carga nominal (Saidur et al., 2012). No entanto, para valores próximos dos 100% de carga, a sua eficiência já apresenta valores inferiores, resultado das perdas devidas à elevação de aquecimento do motor, o que pode também limitar a sua longevidade. Na Figura 5.16 pode ver-se a evolução do rendimento de um motor segundo as percentagens de carga por ele acionada. No entanto, pela Figura 5.15 b) é perceptível que existe uma redução no rendimento, numa situação de funcionamento de um motor a plena carga.

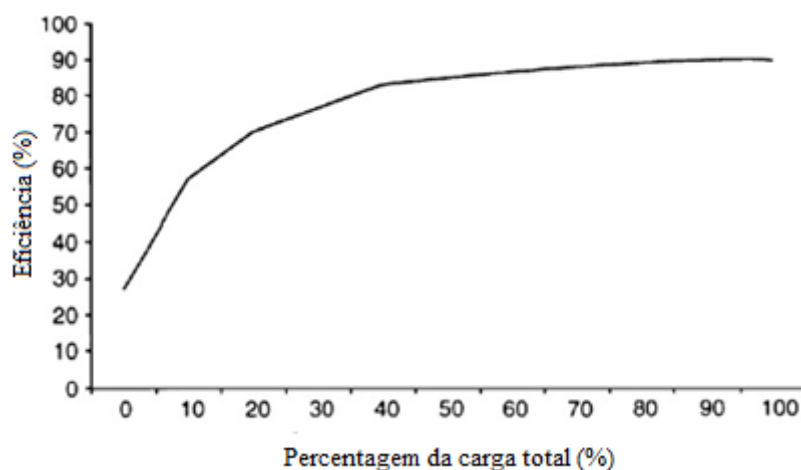


Figura 5.16 - Relação entre Fator de Carga e Eficiência (Saidur, 2010).

Quando se verificam valores iguais ou inferiores a 50% de carga, Figura 5.16, significa que a potência nominal de um motor é largamente superior à qual seria necessária pelo equipamento acionado, estando este motor sobredimensionado. Assim, para além de adquirir um baixo rendimento, a sua operação em baixas cargas conduz a um maior consumo de energia reativa, o qual diminui o fator de potência.

Assim, verifica-se que o *FP* tende a cair mais rapidamente do que o rendimento, nas mesmas condições de cargas parciais. No entanto, quanto maior a potência nominal de um motor, maior será o seu *FP*, Figura 5.17.

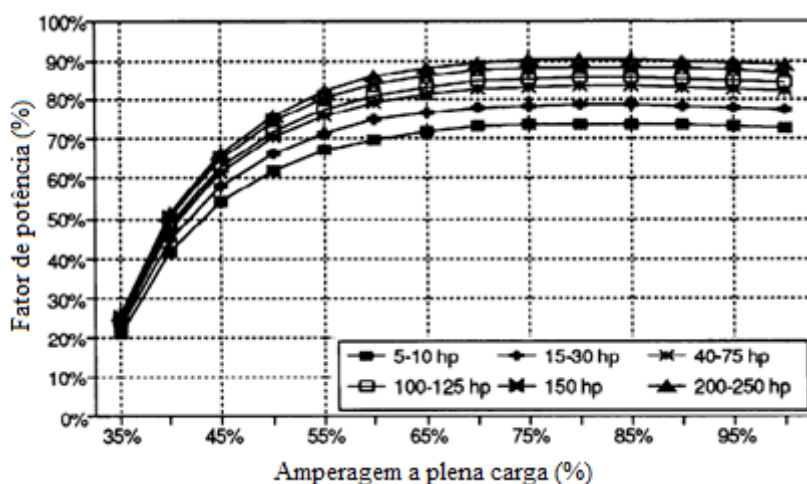


Figura 5.17 - Relação entre Fator de Carga e Fator de Potência (Saidur, 2010).

Quando um motor está sobredimensionado, o seu campo magnético estará também sobredimensionado relativamente à carga, e o *FP* do motor será mais baixo do que se tivesse um dimensionamento correto. Portanto, quando a carga acionada é baixa, e o

motor tem uma potência acima da necessária, existe uma desproporção da corrente magnetizada em relação a essa carga. Como consequência disso, a potência reativa evolui para valores consideráveis baixando o fator de potência (*Saidur, 2010*). No caso contrário, para fatores de carga próximos dos nominais (motor está bem dimensionado), observa-se uma melhoria do fator de potência.

De acordo com a Figura 5.18, e recorrendo novamente ao triângulo de potências, verifica-se que o triângulo da esquerda será a situação mais favorável, uma vez que para baixos valores de θ , resultam FP mais elevados. Neste caso, a medida de energia reativa é mais baixa, do que a representada pelo triângulo das potências da direita.

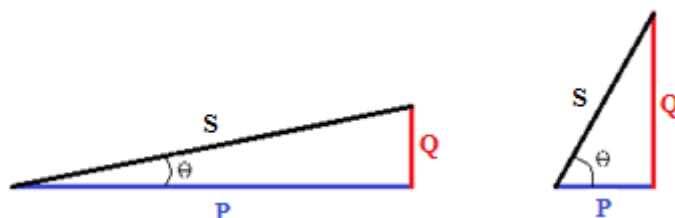


Figura 5.18 - Comparação entre um alto FC e um baixo FC de um motor.

Assim, é de extrema importância a escolha de um motor com a potência certa para que este funcione perto da sua carga nominal e de forma eficiente.

5.5.4 Evolução das classes de eficiência dos motores elétricos.

Ao usar a energia de uma forma conservadora e responsável, podem poupar-se recursos, reduzir a quantidade de emissões de CO_2 e diminuir a fatura energética. Como foi referido, as máquinas acionadas por motores elétricos na indústria consomem 2/3 de toda a energia elétrica utilizada. Se todos os antigos sistemas da indústria e comércio europeus, fossem substituídos por sistemas modernos, resultaria numa economia anual de energia de 135 *MWh* e na redução de muitos milhões de toneladas de emissões de CO_2 (*CEMEP, 2011*). Portanto, o objetivo de melhorar a eficiência energética dos motores, levou a que várias entidades emitissem regras para classificação de motores elétricos em relação ao seu rendimento nominal.

Em 1998, na Europa, a *CEMEP* (Associação Europeia de Motores e Fabricantes de Produtos de Automação) e os fabricantes de motores assinaram um acordo voluntário para a classificação da eficiência dessas máquinas (*WEG, 2014*). Então, ficaram estabelecidas as seguintes classes de eficiência: *EFF1* para os motores de Alta

Eficiência, a *EFF2* para a classe de motores com uma Eficiência Aumentada e por último a *EFF3* corresponde à classe de Eficiência Standard.

Contudo, vieram a ser introduzidas novas classificações de eficiência energética por outros países mundiais, diferindo os valores em relação às suas características. Assim, para evitar este problema, a Comissão Eletrotécnica Internacional (*IEC*), criou no ano de 2008 uma norma internacional de classificação para os motores elétricos (*IEC 60034 – 30*). Esta norma define um novo sistema de classificação, o que levou a uma homogeneização do mercado (*ABB 2011*). Por outro lado, graças à evolução dos últimos anos, a classificação será feita de acordo com as continuas melhorias nos rendimentos energéticos dos motores.

Portanto, segundo a norma do *IEC*, passaram a existir as seguintes classificações para os motores com potências nominais entre os *0,75kW* e os *350kW*: *IE1*-Rendimento Standard (comparável à *EFF2*), *IE2*- Alto Rendimento (comparável à *EFF1*), *IE3*- Rendimento Premium e *IE4*-Rendimento Super Premium. Na Figura 5.19 pode ver-se a relação entre as eficiências dos motores e as suas classes. De uma forma geral, quanto maior for a classe *IE*, e a potência nominal, superior será a eficiência para esses motores.

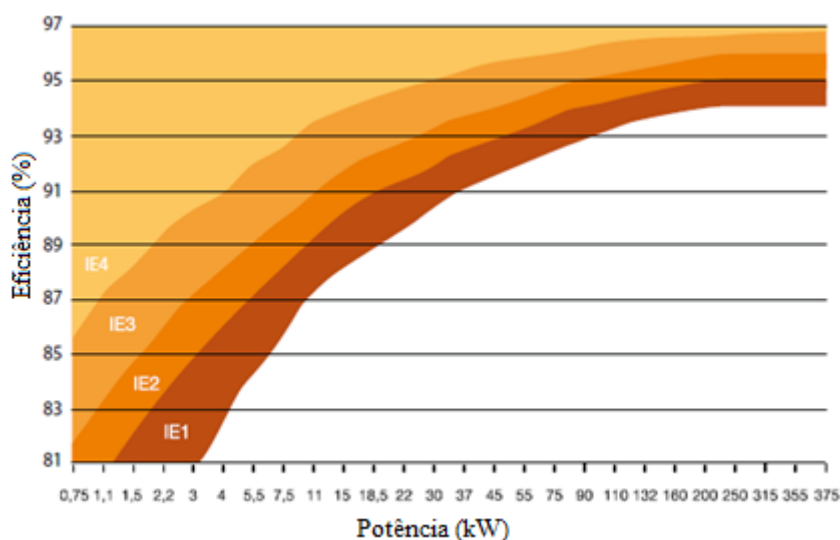


Figura 5.19 - Classes de eficiência de um motor.

5.6 Redutor de velocidade

Um motoredutor é composto por um motor elétrico e por um redutor de velocidade por engrenagens. O motor elétrico está diretamente ligado ao redutor através do seu eixo de saída, o qual transmitirá o seu movimento rotativo às engrenagens do redutor.

Os motoredutores permitem que com um motor de baixa potência, seja possível impulsionar uma grande quantidade de força, a uma velocidade reduzida. Com duas ou mais engrenagens de tamanhos diferentes (logo número diferente de dentes), é possível diminuir a velocidade de um motor. A disposição das engrenagens do redutor afeta a sua eficiência. Segundo o catálogo de redutores da *NORD*, cada estágio de engrenagens apresenta uma eficiência de 98%. Este valor pode baixar quanto maior o número de estágios. Ainda assim, é nos casquilhos de deslizamento onde existem as maiores perdas.

No sistema em estudo, existem motoredutores associados ao sem-fim de transporte, e ao sem-fim de alimentação, sendo que sua aplicação induz uma baixa rotação aos sem-fins de forma a ajustar o caudal de entrada de combustível dentro da fornalha.

5.7 Variador eletrónico de velocidades

A tecnologia atual exige diferentes velocidades em muitos processos onde são utilizados motores elétricos. Normalmente, os motores têm apenas dois estados de funcionamento: parado e de operação à sua velocidade máxima.

Desta forma, o funcionamento de um motor à sua velocidade máxima, mantém constante a energia consumida no seu valor máximo. No entanto, se a carga diminuir, este motor passa a funcionar de forma ineficiente, pois dá-se o aumento da potência reativa e a correspondente diminuição do *FP*. Assim, se a velocidade do motor for reduzida em função do requisito de carga, podem ser preservadas quantidades significativas de energia (Saidur et al., 2012). Isto é possível pela aplicação de variadores eletrónicos de velocidade. Estes aparelhos controlam a velocidade dos motores, pela alteração da frequência de alimentação, alterando a potência absorvida dos motores, melhorando assim a sua eficiência.

Em equipamentos como ventiladores ou bombas, o consumo de energia é proporcional ao cubo da velocidade do motor associado, pelo que pequenas reduções na

velocidade resultam em grandes reduções de energia poupada (*Saidur et al.*, 2012). Pela Tabela 5.2 é possível ver que o consumo de energia cai muito mais do que a redução de velocidade do motor. Estes valores relacionam-se pela lei da afinidade entre a velocidade de rotação e a potência, pela (Eq. 5.22).

$$\left(\frac{RPM_1}{RPM_2}\right)^3 = \left(\frac{P_{medida,1}}{P_{medida,2}}\right) \quad (Eq. 5.22)$$

Tabela 5.2 - Poupança de energia pela redução da velocidade (*Saidur* 2010).

Redução da velocidade (%)	Potenciais ganhos energéticos (%)
10	22
20	44
30	61
40	73
50	83
60	89

Além da lei anteriormente descrita, podem ser enunciadas outras duas leis de afinidade para aplicações que envolvem pressões (Eq. 5.23) e caudais (Eq. 5.24), (*Grundfos*, 2004). Destas equações pode ver-se que a pressão é proporcional ao quadrado da velocidade, enquanto que o fluxo e a velocidade têm uma relação de proporcionalidade direta entre si.

$$\left(\frac{RPM_1}{RPM_2}\right)^2 = \left(\frac{Pressão_1}{Pressão_2}\right) \quad (Eq. 5.23)$$

$$\left(\frac{RPM_1}{RPM_2}\right) = \left(\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2}\right) \quad (Eq. 5.24)$$

Segundo (*Saidur*, 2010), a introdução de variadores de velocidade nas aplicações apropriadas, iria resultar numa economia de 41% da energia utilizada em motores industriais.

O motor associado ao ventilador de exaustão da caldeira em estudo está equipado com um variador de velocidade. Nesta aplicação, o controlo de velocidade é usado para regular o fluxo dos gases de combustão, e é feito de forma automática pelo sistema de acordo com a necessidade momentânea.

5.8 Análise energética do processo de combustão numa fornalha a biomassa

Para a obtenção do balanço energético a uma caldeira, é necessário realizar previamente o balanço mássico correspondente ao sistema de combustão.

5.8.1 Balanço mássico

O balanço mássico de um sistema de combustão, tem como objetivo calcular a composição do caudal de saída dos gases de combustão, tendo como base os caudais de entrada.

Este balanço traduz o princípio geral da conservação da massa, em estado estacionário:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{saida} \quad (Eq. 5.25)$$

Uma vez que, em estado estacionário $\frac{dm}{dt} = 0$, os caudais de entrada (reagentes: biomassa e ar de combustão) são iguais aos caudais de saída (produtos: gases e resíduos de combustão). Na Figura 5.20 são apresentados os caudais mássicos de entrada e saída de um sistema de combustão, (Adaptado de Tarelho, L., 2013).

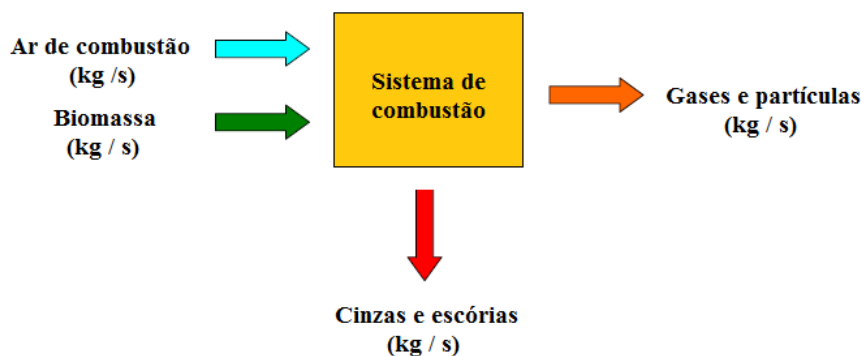


Figura 5.20 - Caudais mássicos de entrada e saída de um sistema de combustão.
(Adaptado de Tarelho, L., 2013)

5.8.2 Balanço energético

O balanço energético de um sistema de combustão tem como objetivo calcular as várias formas de energia ligada a todos os fluxos materiais do sistema.

Assim como o balanço mássico traduz o princípio da conservação da massa, o balanço energético representa o princípio da conservação da energia, (Eq. 5.26).

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) - \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) \quad (Eq. 5.26)$$

Desprezando os termos correspondentes à variação de energia cinética, potencial e de mistura, a variação de energia está fortemente dependente da entalpia, pelo que, para efetuar um balanço energético é necessário calcular a entalpia dos reagentes e produtos.

Portanto, em estado estacionário $\left(\frac{dE}{dt} = 0\right)$, há um equilíbrio entre a entrada (energia da biomassa e ar de combustão) e a saída (gases de combustão, cinzas e escórias, energia útil e energia perdida) de energia, Figura 5.21.

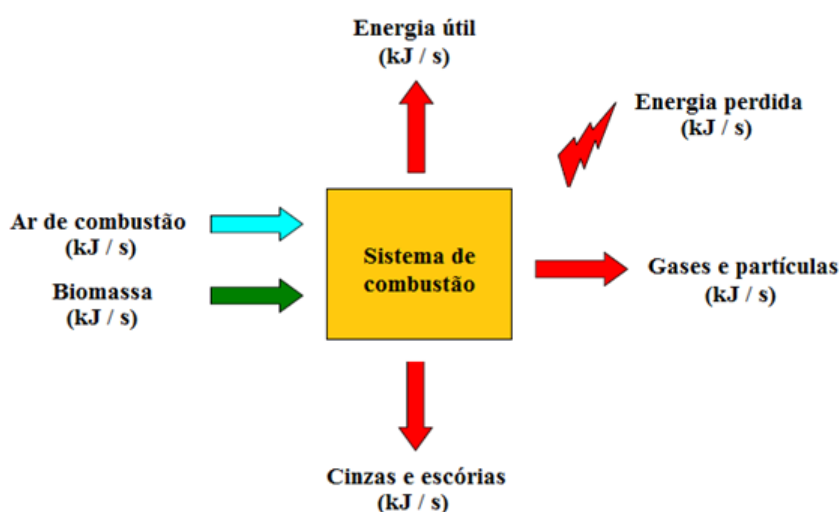


Figura 5.21 - Balanço energético de uma instalação de combustão a biomassa.
(Adaptado de Tarelho, L., 2013)

A (Eq. 5.27) traduz o balanço energético de uma caldeira, o qual se resume a um balanço de entalpia aplicado ao sistema de combustão.

$$\Delta H_{reagentes} = \Delta H_{produtos} + \Delta H_{útil} + \Delta H_{perdido} \quad (J/kg_{biomassa,bs}) \quad (Eq. 5.27)$$

O cálculo das entalpias baseia-se nos seguintes termos:

- ✓ Calor sensível - Define-se como a energia térmica acumulada numa massa material, proporcional à diferença entre a temperatura do material e a temperatura de referência (T°). O calor sensível transportado pela mistura, ou seja, pertencente quer aos reagentes, quer aos produtos é dado por:

$$\Delta H_S = \sum_i n_i \times M_i \times c_{p,i} \times (T - T^\circ) \quad [kJ/kg_{biomassa,bs}] \quad (Eq. 5.28)$$

em que,

$c_{p,i}$ é o calor específico médio referente à espécie i , definido entre T^o e T [$J/kg \cdot K$];

n_i é determinado a partir do balanço mássico [$kmol_i/kg_{biomassa,bs}$];

M_i é a massa molar da espécie i [$kg_i/kmol_i$].

- ✓ Calor latente de vaporização - O calor latente está relacionado com a energia associada a uma mudança de fase de uma substância. Este termo é importante nos sistemas de combustão a biomassa, pois está associado à água, ou seja, à humidade quer do ar de combustão, quer do combustível, quer dos produtos da combustão. O calor latente transportado por uma mistura é dado por:

$$\Delta H_L = \sum_i n_i \times M_i \times h_{i,WV,T^o} \quad [kJ/kg_{biomassa,bs}] \quad (Eq. 5.29)$$

em que,

h_{i,WV,T^o} é o calor latente de vaporização da substância i à temperatura de referência (T^o) [kJ/kg_i].

- ✓ Calor da reação de combustão dos vários componentes combustíveis - Define-se como a entalpia de reação de combustão a pressão constante e à temperatura de referência. Sendo os produtos finais da reação de combustão os considerados no balanço mássico, tem-se que:

$$\Delta H_r = \sum_i n_i \times M_i \times PCI_{i,T^o} \quad [kJ/kg_{biomassa,bs}] \quad (Eq. 5.30)$$

em que,

PCI_{i,T^o} [kJ/kg_i] é o calor de combustão à temperatura de referência T^o , em que a água formada como produto de combustão ocorre na forma gasosa (poder calorífico inferior).

- ✓ Calor aproveitado (Energia útil) - A energia útil, $\Delta H_{\text{útil}}$, é a energia que é possível obter na forma útil, a partir de uma fornalha, através de um permutador de calor.
- ✓ Calor perdido ou dissipado por convecção, condução e radiação através das paredes da caldeira - A energia perdida por um sistema, $\Delta H_{\text{perdida}}$, é devida ao fluxo de calor que se dissipa à superfície das paredes do sistema por convecção, por radiação e por condução, mesmo que seja termicamente isolado.

6 Metodologia e apresentação de resultados

6.1 Balanço energético da fornalha em estudo

Para realização do balanço mássico e energético ao sistema de combustão (fornalha), foi desenvolvida uma folha de Excel baseada na metodologia quer para o cálculo do balanço mássico, quer do balanço energético.

A realização dos referidos balanços baseou-se nos seguintes pressupostos:

1. A combustão é completa.
 - ✓ Todo o C é oxidado a CO_2 ;
 - ✓ Todo o H é oxidado a H_2O ;
 - ✓ Todo o S é oxidado a SO_2 ;
 - ✓ N-fuel não é oxidado a NO, resultando em N_2 ;
 - ✓ Não se formam as espécies C, H_2 , CO, OH, ou hidrocarbonetos nos produtos;
2. O combustível (estilha) apresenta uma humidade em base tal e qual (w_{WH}) de 40%.
3. A base de cálculo assenta na unidade de massa do combustível seco a queimar [$kg_{\text{combustível},bs}$].
4. Utilizou-se um valor de excesso de ar (z) = 1,50.
5. Ar de combustão é seco.
6. A energia existente nas cinzas é irrelevante no balanço energético efetuado, pelo que a sua formação não é considerada importante.

No desenvolvimento do método de cálculo para o balanço mássico e energético, foram utilizadas como referência os métodos de (Tarelho, L., 2013) e (Matos, A., 2012).

6.1.1 Balanço mássico

6.1.1.1 Reagentes

Os reagentes são constituídos pelos resíduos a queimar (biomassa) e pelo ar de combustão (ar primário e secundário).

➤ *Composição ponderal elementar*

Relativamente à composição ponderal da biomassa que se queimou, esta tem em conta o teor ponderal de vários elementos químicos que constituem a fração orgânica.

De acordo com a Tabela 3.2:

- ✓ $w_{CR} = 0,488 [kg_{carbono}/kg_{biomassa,bs}]$
- ✓ $w_{HR} = 0,058 [kg_{hidrogénio}/kg_{biomassa,bs}]$
- ✓ $w_{OR} = 0,449 [kg_{oxigénio}/kg_{biomassa,bs}]$
- ✓ $w_{NR} = 0,002 [kg_{azoto}/kg_{biomassa,bs}]$
- ✓ $w_{SR} = 0,0001 [kg_{enxofre}/kg_{biomassa,bs}]$

Quanto à razão mássica da humidade em base seca (W_{WR}), pode ser obtida por:

$$W_{WR} = \frac{w_{WH}}{1-w_{WH}} [kg_{H_2O}/kg_{biomassa,bs}] \quad (Eq. 6.1)$$

Uma vez que $w_{WH} = 0,4$, então $W_{WR} = 0,667 [kg_{H_2O}/kg_{biomassa,bs}]$.

➤ *Excesso de ar (z)*

Como nenhuma fornalha é um reator ideal, o combustível e o comburente não têm uma distribuição uniforme, originando desta forma uma resistência à transferência de calor e de massa que tornam a reação de combustão incompleta. No sentido de minimizar estes efeitos, é normal que as fornalhas trabalhem com excesso de ar, relativamente à estequiometria. O excesso de ar é dado por:

$$z = \left(\frac{W_a}{W_s} - 1 \right) \quad (Eq. 6.2)$$

em que,

$W_a [kmol O_2 \text{ atual}/kg_{biomassa,bs}]$ é o consumo atual de oxigénio;

$W_s [kmol O_2 \text{ estequiométrico}/kg_{biomassa,bs}]$ é a necessidade estequiométrica de oxigénio, dada por:

$$W_s = \left(\sum \left(Y_{s,j} \times \frac{w_{jR}}{M_j} \right) - \frac{w_{OR}}{M_{O_2}} \right) \quad (Eq. 6.3)$$

em que,

$Y_{s,j}$ é o consumo estequiométrico de oxigénio do elemento j $[kmol_{O_2}/kmol_j]$;

M_j é a massa molecular de cada elemento j, os quais estão representados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Consumo estequiométrico de oxigénio e massa molar por elemento j.

Consumo estequiométrico de oxigénio [$kmol_{O_2}/kmol_j$]		Massa molecular [$kg_j/kmol_j$]	
$y_{S,C}$	1	M_C	12
$y_{S,H}$	0,5	M_H	2
$y_{S,O}$	-	M_O	32
$y_{S,N}$	-	M_N	14
$y_{S,S}$	1	M_S	32

Logo,

$$W_s = 0,041139 [kmol O_2 \text{ estequiométrico } / kg_{biomassa,bs}]$$

Uma vez que, $z = 1,50$, pela (Eq. 6.2) obtém-se que:

$$W_a = 0,1028 [kmol O_2 \text{ atual } / kg_{biomassa,bs}]$$

6.1.1.2 Produtos

Além das cinzas e escórias formadas durante o processo de combustão da biomassa, também são formados vários compostos gasosos. Como a fração mássica de cinzas na biomassa (estilha) está entre 2% a 4% ($kg_{cinza}/kg_{biomassa,bs}$), a sua formação é relativamente reduzida no total de produtos formados. Assim, serão apenas considerados os gases como produtos do processo de combustão.

Para a execução do balanço mássico, adotou-se a seguinte nomenclatura para cada produto gasoso n_i , Tabela 6.2:

Tabela 6.2 - Referência utilizada, para o conjunto de produtos gasosos.

produto gasoso	n_i [$kmol_{\text{gás } i \text{ produzido}}/kg_{\text{biomassa}}$]
CO ₂	1
H ₂ O	2
O ₂	5
N ₂	6
SO ₂	8

6.1.1.3 Balanço mássico

O balanço mássico de cada elemento C,H,O,N,S, ao sistema de combustão foi realizado utilizando as seguintes equações de balanço parcial de cada elemento químico:

- Para o Carbono (C):

$$\frac{W_{CR}}{12} = n_{1R} + n_{3R} + \left(\frac{W_{CV} + W_{VR} + W_{CE} + W_{ER}}{12} \right) \quad (Eq. 6.4)$$

- Para o Hidrogénio (H):

$$\frac{W_{HR}}{2} + \frac{W_{WR}}{18} + \frac{W_a + W_{VA} \times 7,66}{32} = n_{2R} + n_{4R} \quad (Eq. 6.5)$$

- Para o Oxigénio (O):

$$\begin{aligned} \frac{W_{OR}}{32} + \frac{0,5 \times W_{WR}}{18} + \frac{W_a}{32} \times (1 + 0,5 \times W_{VA} \times 7,66) \\ = n_{1R} + \frac{n_{2R}}{2} + \frac{n_{3R}}{2} + n_{5R} + \frac{n_{7R}}{2} + n_{8R} \end{aligned} \quad (Eq. 6.6)$$

- Para o Azoto (N):

$$\frac{W_{NR}}{14} + 2 \times \frac{W_a}{32} \times 3,76 = 2 \times n_{6R} + n_{7R} \quad (Eq. 6.7)$$

- Para o Enxofre (S):

$$\frac{W_{SR}}{32} = n_{8R} \quad (Eq. 6.8)$$

Não considerando a contribuição das cinzas, e que o ar de combustão é seco ($W_{VA} = 0$ ($kg_{H_2O}/kg_{ar\ seco}$)), o balanço mássico a cada componente resultante é dado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Balanço mássico elementar

n_i	$kmol_{jR}/kg_{biomassa,bs}$
n1 (CO ₂)	0,040667
n2 (H ₂ O)	0,066037
n3	0
n4	0
n5 (O ₂)	0,061708
n6 (N ₂)	0,386845
n7	0
n8 (SO ₂)	0,000003

Assim, é possível determinar a produção de uma quantidade de gases por unidade de massa de combustível. Estes gases podem ser distinguidos em gases secos ou húmidos, os quais se podem obter por:

- Gases húmidos:

$$G_t = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 + n_8$$

$$= 0,555 \left[\frac{kmol_{gases\ de\ combust\tilde{a}o\ h\acute{u}midos}}{kg_{biomassa,bs}} \right] \quad (Eq. 6.9)$$

- Gases secos:

$$G_{t,s} = n_1 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 + n_8$$

$$= 0,489 \left[\frac{kmol_{gases\ de\ combust\tilde{a}o\ secos}}{kg_{biomassa,bs}} \right] \quad (Eq. 6.10)$$

6.1.2 Balanço energético

No desenvolvimento da metodologia de cálculo do balanço energético, foram considerados os seguintes parâmetros:

- $PCS = 19.221 [kJ/kg_{biomassa,bs}]$, obtido pela [Eq. 3.1];
- $PCI_R = 17.946 [kJ/kg_{biomassa,bs}]$, obtido pela [Eq. 3.2];

Não tendo sido possível a monitorização da temperatura no interior da fornalha e dos gases de exaustão depois da troca térmica com a água, foram utilizados alguns valores de referência fornecidos pela *Ventil*, tal que:

- $T_{c\grave{a}mara\ de\ combust\tilde{a}o} = 850^{\circ}C\ ou\ 1.123\ K$;
- $T_{sa\acute{ı}da\ de\ gases} = 150^{\circ}C\ ou\ 423\ K$;
- $T^o = 25^{\circ}C\ ou\ 298\ K$; (Temperatura de referência)
- $T_{biomassa} = T_{ar\ combust\tilde{a}o\ (seco)} = 25^{\circ}C\ ou\ 298\ K$;
- $C_{p,biomassa} = 1 [J/kg_{biomassa,bs} \cdot K]$
- $C_{p,H_2O} = 4,184 [kJ/kg \cdot K]$

Como referido no capítulo anterior, a entalpia é a função termodinâmica de estado adequada para a realização do balanço energético. Assim, foram calculados para os reagentes e produtos as entalpias das seguintes fontes de energia:

Calor sensível

- ✓ O calor sensível dos reagentes, $\Delta H_{S, reagentes}$, refere-se à energia transportada pela biomassa e pelo ar de combustão, devido a apresentarem uma temperatura diferente da temperatura de referencia. É dado por:

$$\Delta H_{S, reagentes} = [1 \times c_{P,R} + W_{WR} \times c_{P,W}] \times (T_{biomassa} - T^o) + W_a \times [1 \times c_{P,O_2} + 3,31 \times c_{P,N_2} + 4,31 \times W_{VA} \times c_{P,H_2O(g)}] \times (T_{ar} - T^o) \quad (Eq. 6.11)$$

Uma vez que as temperaturas do combustível e do ar são iguais à temperatura de referência, tem-se que:

$$\Delta H_{S, reagentes} = 0 \quad [kJ/kg_{biomassa,bs}]$$

- ✓ O calor sensível dos produtos, $\Delta H_{S, produtos}$, refere-se à energia transportada pelos gases de combustão e pelas cinzas, pois apresentam uma temperatura diferente da temperatura de referência. Esta componente energética é dada por:

$$\Delta H_{S, produtos} = [\sum_i n_i \times M_i \times c_{P,i}] \times (T_{gases} - T^o) + [(w_{ZV} \times W_{VR} + w_{ZE} \times W_{ER}) \times c_{P,Z}] + [(w_{CV} \times W_{VR} + w_{CE} \times W_{ER})] \times (T_{cinzas} - T^o) \quad (Eq. 6.12)$$

Uma vez que a energia transportada pelas cinzas ou escórias é normalmente muito pequena, esta componente não foi considerada no balanço energético. Assim, considerou-se apenas o calor sensível dos gases produzidos no processo de combustão, de modo que:

$$\Delta H_{S, produtos} = 2.123,03 \quad [kJ/kg_{biomassa,bs}]$$

Para a realização deste cálculo, sabendo que $1[cal] = 4,184[J]$, foram considerados os valores de M_i e $c_{P,i}$ presentes na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Massa molar e calor específico médio referente a cada espécie j.

i	$M_i [kg_i/kmol_i]$	$c_{P,i} [kcal/(kg \cdot K)]$
CO ₂	44	0,21568
H ₂ O	18	0,45086
O ₂	32	0,22313
N ₂	28	0,24875
SO ₂	64	0,15769

Calor latente

- ✓ O calor latente dos reagentes, $\Delta H_{L, reagentes}$, é a quantidade de energia necessária para evaporar a água transportada pelo combustível à temperatura de referência. É dado por:

$$\Delta H_{L, reagentes} = W_{WR} \times h_{i, WV, T^o} \quad (Eq. 6.13)$$

Dado que $h_{i, WV, 25^oC} = -2.442,3 \text{ kJ/kg}_{H_2O}$, obtém-se que:

$$\Delta H_{L, reagentes} = -1.628,2 \quad [kJ/kg_{biomassa, bs}]$$

- ✓ O calor latente dos produtos, $\Delta H_{L, produtos}$, neste caso será nulo. A temperatura de saída dos gases do sistema de combustão não permite que haja condensação de produtos no interior do sistema de combustão. Assim:

$$\Delta H_{L, produtos} = 0 \quad [kJ/kg_{biomassa, bs}]$$

Calor de reação de combustão

- ✓ O calor de reação dos reagentes, $\Delta H_{r, reagentes}$, é o calor de combustão da biomassa, tendo água no estado gasoso como produto. Assim, como existe uma equivalência entre a entalpia de combustão e o PCI , tem-se que:

$$\begin{aligned} \Delta H_{r, reagentes} &= PCI_R \\ &= 17.946 \quad [kJ/kg_{biomassa, bs}] \end{aligned} \quad (Eq. 6.14)$$

- ✓ O calor de reação dos produtos, $\Delta H_{r, produtos}$, é o calor de combustão dos produtos inqueimados, ou seja, é o calor de reação de gases ainda combustíveis do tipo H_2 e CO , e ainda o calor de reação do carbono residual que acompanha as cinzas. Como não está a ser considerada a formação de cinzas e se considerou que no regime de combustão completa não existe a formação dos produtos gasosos inqueimados, tem-se que:

$$\Delta H_{r, produtos} = 0 \quad [kJ/kg_{biomassa, bs}]$$

6.1.2.1 Energia dos reagentes

A energia dos reagentes, $\Delta H_{reagentes}$, refere-se à energia contida na biomassa a queimar e no ar de combustão, tal que:

$$\Delta H_{reagentes} = [\Delta H_S + \Delta H_L + \Delta H_r]_{reagentes} \quad (Eq. 6.15)$$

Logo,

$$\Delta H_{reagentes} = 0 - 1.628,2 + 17.946 = 16.317,8 \quad [kJ/kg_{biomassa,bs}]$$

6.1.2.2 Energia dos produtos

A energia dos produtos, $\Delta H_{produtos}$, diz respeito à energia dos gases produzidos na combustão da biomassa, assim como a energia contida nas cinzas, tal que:

$$\Delta H_{produtos} = [\Delta H_S + \Delta H_L + \Delta H_r]_{produtos}$$

Uma vez que a energia contida nas cinzas foi desprezada, contabilizou-se apenas a energia dos gases de combustão.

Logo,

$$\Delta H_{produtos} = 2.123,03 + 0 + 0 = 2.123,03 \quad [kJ/kg_{biomassa,bs}]$$

6.1.2.3 Balanço energético

De acordo com a (Eq. 5.27), a energia útil do sistema é dada por:

$$\Delta H_{\acute{u}til} = \Delta H_{reagentes} - \Delta H_{produtos} - \Delta H_{perdida}$$

De acordo com as considerações feitas no ponto 5.8.2, qualquer caldeira perde calor através das suas paredes. A incerteza associada a este método permite utilizar um valor típico para quantificar esta energia perdida. O valor adotado para as perdas de energia pelas paredes da caldeira é de 5% relativamente à energia total de entrada. Assim,

$$\Delta H_{perdida} = \Delta H_{reagentes} \times 0,05 = 815,91 \quad [kJ/kg_{biomassa,bs}]$$

$$\text{Logo, } \Delta H_{\acute{u}til} = 16.317,8 - 2.123,03 - 815,91 = 13.378,86 \quad [kJ/kg_{biomassa,bs}]$$

6.2 Motores elétricos

Atualmente, o mercado das caldeiras, requer que se desenvolvam sistemas energeticamente eficientes nos vários componentes da sua operação. Os consumos energéticos associados à operação do sistema são um aspeto essencial a caracterizar e otimizar, nomeadamente, os consumo de equipamentos elétricos e a sua respetiva eficiência.

A existência de motores elétricos é de extrema importância na operação de um sistema *Ventil*, pois são necessários para movimentar o combustível, o ar e a água. Assim, o sistema adquire a sua independência de tarefas manuais, uma melhoria no processo de combustão e de condução/extração dos gases.

Para o desenvolvimento desta parte do trabalho, foi realizada uma recolha de dados aos motores associados à caldeira em estudo, a qual tem a potência necessária para aquecer 4 pavilhões com uma área próxima dos 1.600 m². Na Figura 6.1 encontra-se o fluxograma do trabalho realizado, com a informação referente a cada etapa do processo de análise, desde a recolha de dados até às propostas de melhoria encontradas.

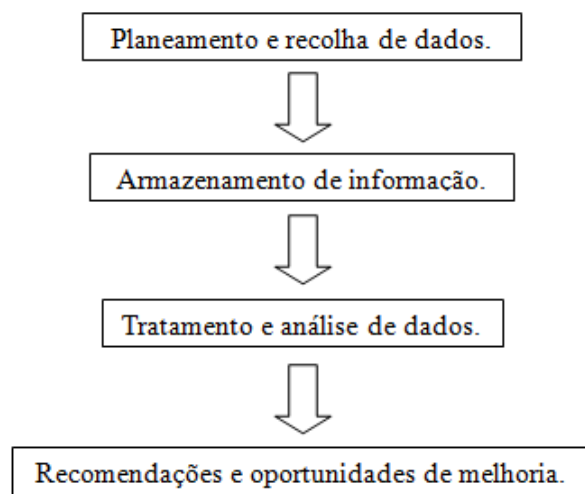


Figura 6.1 - Fluxograma da metodologia adotada.

A recolha dos dados relativos ao consumo dos motores elétricos do sistema, foi feita à potência nominal de funcionamento da fornalha/caldeira. Esses dados foram obtidos a partir do quadro elétrico geral do sistema, para um motor de cada vez, com passo temporal de 10 segundos, até ser obtido um perfil de vários estágios de pára/arranque.

Para se obter a paragem e arranque dos motores, foi definido um parâmetro no quadro elétrico de controlo dos equipamentos auxiliares da caldeira, para a temperatura da água no seu interior. Assim, quando a água atinge os $82,5^{\circ}\text{C}$, o sistema de alimentação à caldeira para, até a temperatura baixar aos 80°C , altura em que volta a ser iniciado um novo reaquecimento da água, Figura 6.2.

Quando se atingia a temperatura máxima definida, o sistema parava, ou seja, paravam todos os motores exceto as bombas, pois o seu regime de funcionamento é definido pela necessidade de distribuição de calor pelos pavilhões. Assim o funcionamento das bombas é independente do funcionamento do restante sistema. Já quando a temperatura baixava até à temperatura mínima definida, os todos os motores voltavam a arrancar iniciando um novo processo de aquecimento.

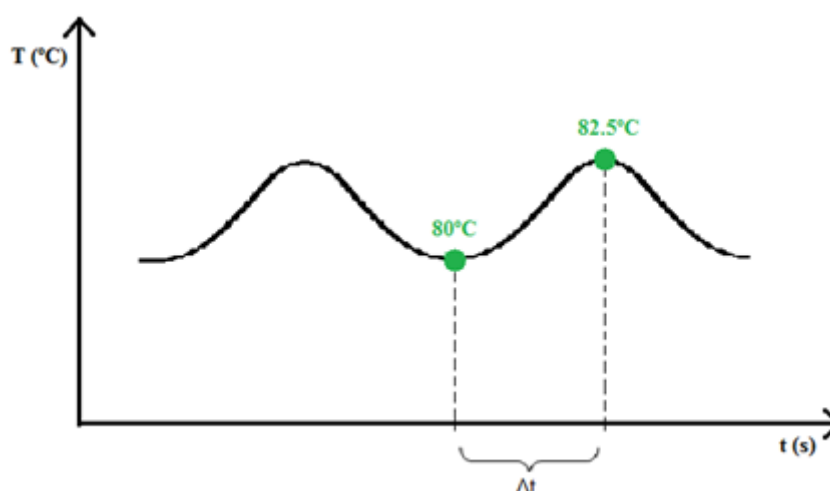


Figura 6.2 - Temperatura mínima e máxima da água à saída da caldeira.

Aparelho de medida

O aparelho utilizado na recolha dos dados foi o analisador de energia ‘Vega 76’, Figura 6.3. Assim, foi possível recolher e armazenar os valores médios, mínimos e máximos relativos à tensão e corrente de cada fase, da frequência, da potência total, potência ativa, potência reativa, potência aparente, do fator de potência, das energias ativa, reativa e aparente, e dos respetivos harmónicos.



Figura 6.3 - Analisador de energia 'Vega 76'.

Após a recolha da informação necessária para o estudo, armazenaram-se todos os dados relativos a cada motor elétrico no Microsoft Excel, tendo sido aí feito todo o tratamento e análise dos dados.

Portanto, foi calculado o rendimento médio, a potência média, a potência mecânica, o fator de carga, a energia consumida num ano, e obviamente o custo associado ao funcionamento de cada motor.

Assim, de acordo com os resultados obtidos pela análise, serão discutidos vários aspetos de melhoria na operação do sistema, os quais podem ser sugeridos ao utilizador, de modo a reduzir a sua fatura energética.

6.2.1 Características elétricas dos motores em estudo

Os motores elétricos são indispensáveis e de extrema importância no processo de funcionamento do sistema em estudo, como de facto, foi verificado anteriormente no presente documento. Para a análise e caracterização dos consumos relativos a cada motor, foi feito um levantamento das suas respetivas características, apresentadas na Tabela 6.5.

No sistema, existem 14 motores elétricos associados, dos quais, 8 motores e suas respetivas bombas são os responsáveis pela distribuição de água quente pelos pavilhões a aquecer. Estes 8 motores apresentam a mesma potência nominal, pelo que apenas um desses motores foi considerado na análise. Os restantes motores estão acoplados a um sistema hidráulico, a dois sem-fins e a três ventiladores.

Tabela 6.5 - Características dos motores analisados.

	<i>Sistema Hidráulico</i>	<i>Sem-fim Transporte</i>	<i>Sem-fim Alimentação</i>	<i>Ventilador Insuflação de ar primário</i>	<i>Ventilador Insuflação de ar secundário</i>	<i>Ventilador Extração</i>	<i>Bomba</i>
Potência nominal (kW)	4	2,2	2,2	4	1,5	11	2,2
Classe de Eficiência	IE2	IE2	IE1	IE2	IE2	IE2	IE3
Tensão de Alimentação (V)	400	400	400	400	400	400	400
Intensidade de Corrente (A)	8,14	4,7	5,22	7,57	3,14	20	4,45
Frequência (Hz)	50	50	50	50	50	50	50
Fator de Potência	0,81	0,8	0,74	0,87	0,84	0,87	0,88
Rendimento teórico (%)	86,6	85,4	80,8	85,8	81,3	90	85,9
Rotações (r.p.m.)	1430	1425	1440	2910	2860	1470	3000

Com o objetivo de se realizar uma análise energética, com os dados obtidos a partir do analisador de energia ‘Veja 76’, foi possível calcular a carga média relativa a cada motor, assim como os seus rendimentos. Nas Figuras 37, 38, 39, 40, 41, 42 e 43 pode observar-se o comportamento correspondente a cada motor, durante o período de medições efetuadas.

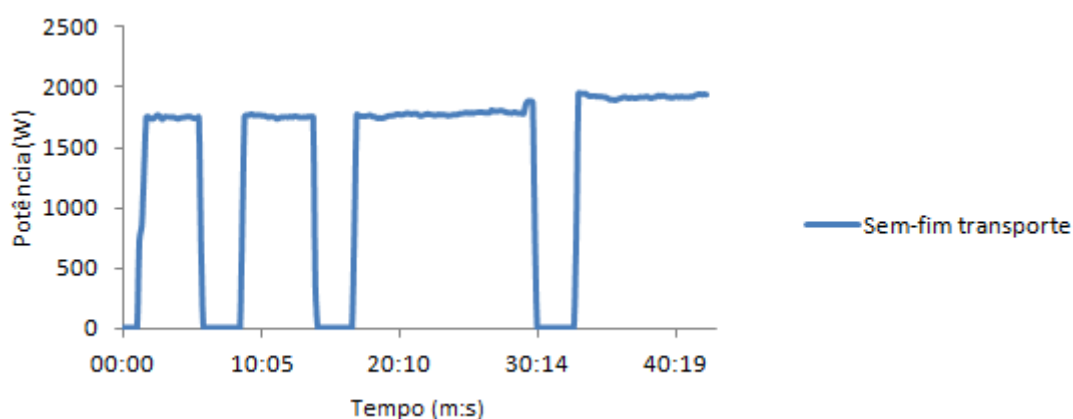


Figura 6.4 - Potência absorvida pelo motor associado ao sem-fim de transporte.

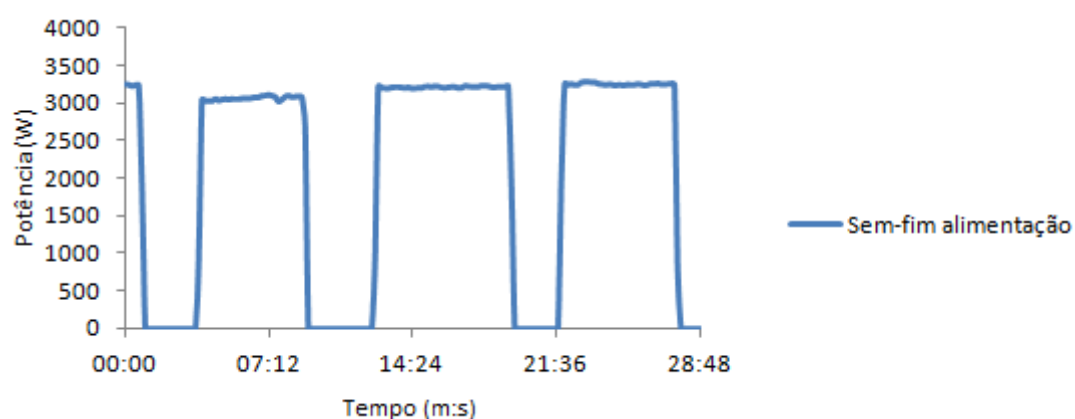


Figura 6.5 - Potência absorvida pelo motor associado ao sem-fim de alimentação.

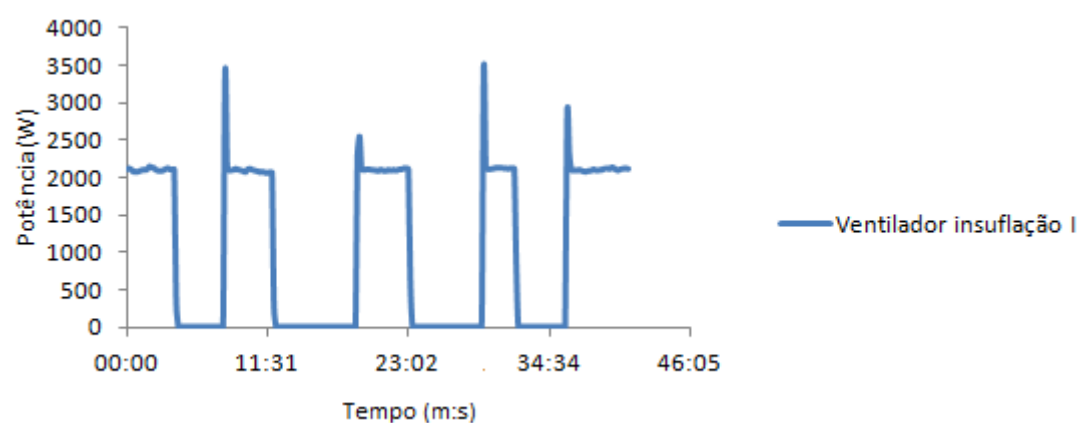


Figura 6.6 - Potência absorvida pelo motor associado ao ventilador de insuflação I.

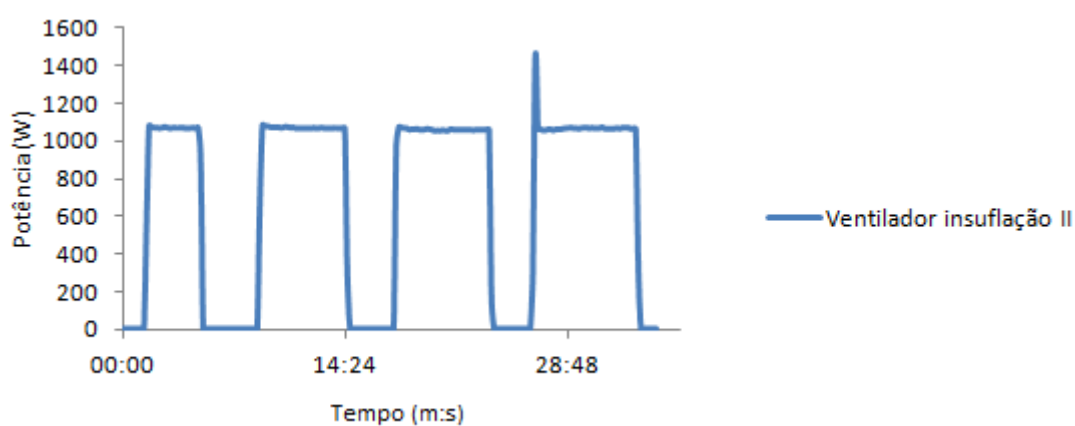


Figura 6.7 - Potência absorvida pelo motor associado ao ventilador de insuflação II.

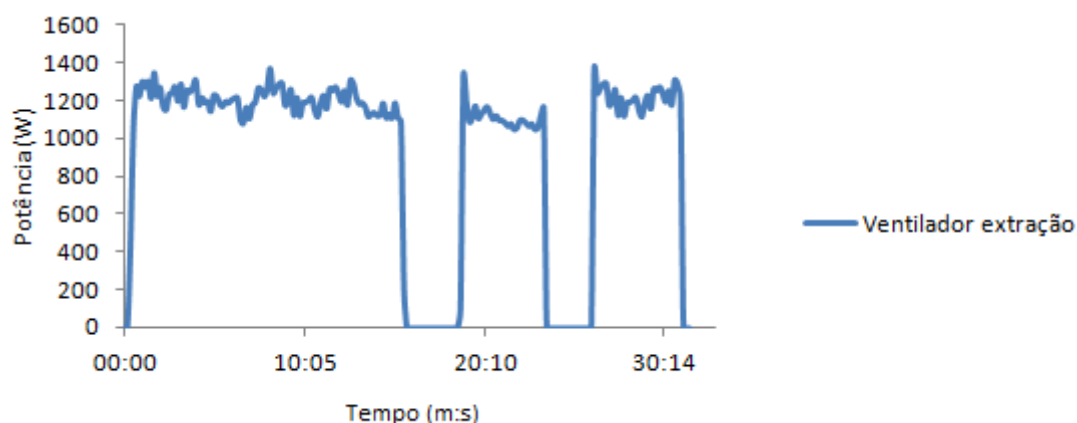


Figura 6.8 - Potência absorvida pelo motor associado ao ventilador de extração.

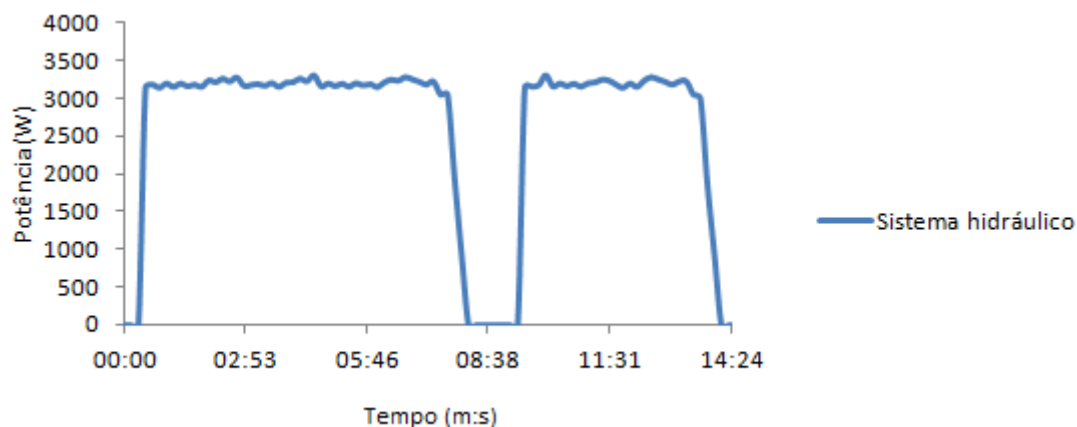


Figura 6.9 - Potência absorvida pelo motor associado ao sistema hidráulico.

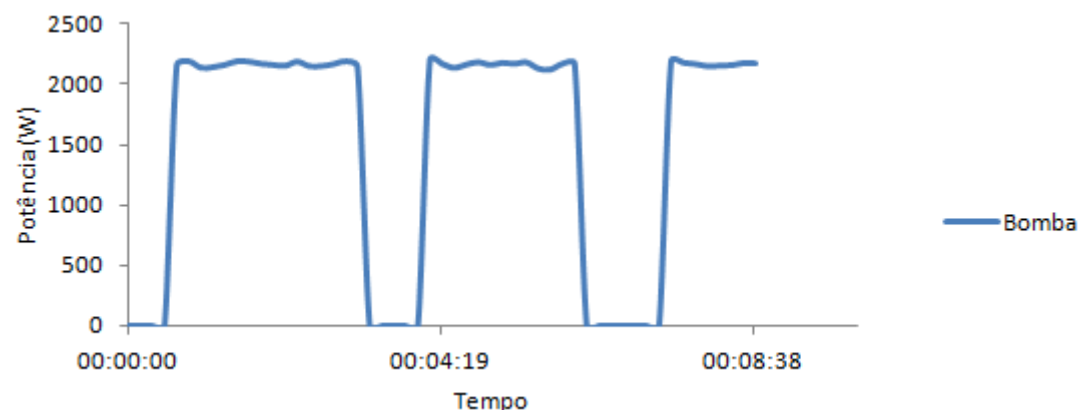


Figura 6.10 - Potência absorvida do motor associado à bomba.

Pela análise visual dos gráficos, os motores revelam ter um comportamento idêntico, variando apenas na potência absorvida de cada um. Esta potência absorvida pelos motores é praticamente a mesma em cada ciclo do regime para/arranque, sofrendo ligeiras variações, ou picos de carga em alguns casos, nomeadamente no arranque.

7 Apresentação e discussão de resultados

7.1 Balanço energético da fornalha

A finalidade do balanço energético ao sistema de combustão em estudo, foi de quantificar a energia envolvida no processo, de acordo com os caudais mássicos de materiais que intervêm no mesmo. Na Tabela 7.1 está resumida a informação envolvida no balanço energético efetuado (secção 6.1.2).

Tabela 7.1 - Componentes do balanço energético da fornalha em estudo.

	$(kJ/kg_{biomassa,bs})$				
	ΔH_S	ΔH_L	ΔH_R	ΔH_{TOTAL}	$\Delta H_{\acute{u}til}$
$\Delta H_{REAGENTES}$	0	-1.628,2	17.946	16.317,8	13.378,86
$\Delta H_{PRODUTOS}$	2.123,03	0	0	2.123,03	

A energia química (PCI do combustível) por kg de biomassa (em base seca) introduzida na fornalha, é $17.946 \text{ kJ/kg}_{biomassa,bs}$. Uma parte desta energia é consumida na evaporação da água existente na biomassa, pelo que, a energia total obtida pela combustão dos reagentes é estimada em $16.317,8 \text{ kJ/kg}_{biomassa,bs}$.

Naturalmente, um sistema de conversão de energia tem perdas associadas. Ignorando a energia associada à descarga de cinzas, as perdas associadas ao processo consistem sobretudo na energia contida nos gases de exaustão ($2.123,03 \text{ kJ/kg}_{biomassa,bs}$) e na perda de energia pelas paredes da caldeira ($815,91 \text{ kJ/kg}_{biomassa,bs}$).

Portanto, contabilizada toda a energia de entrada e todas as perdas consideradas, obteve-se como energia útil para aquecer água, cerca de $13.378,86 \text{ kJ/kg}_{biomassa,bs}$.

7.1.1 Eficiência da caldeira

Como se conhece a quantidade de energia introduzida na fornalha, $[\Delta H_{Reagentes}]$, e a quantidade de energia que é perdida pela mesma, é possível calcular a eficiência térmica do presente sistema de combustão.

$$\eta_{th} = \frac{\Delta H_{Reagentes} - \text{Energia perdida pelo sistema}}{\Delta H_{Reagentes}} = 81,99\%$$

Segundo (Tarelho, 2013) a eficiência térmica do processo numa caldeira deste tipo pode atingir os 85%. Portanto considera-se que o valor do rendimento obtido se enquadra no valor de referência.

7.1.2 Potência de funcionamento da caldeira

Assim como foi referido no Capítulo 4, a caldeira em estudo apresenta uma potência nominal de 2.325 kW_{th} ($2.000.000 \text{ kcal/h}$). Através da (Eq. 7.1), foi possível estimar o valor da potência da operação da caldeira no período em que se fez a recolha dos dados de consumos elétricos por parte dos motores.

$$P = \Delta T \times Cp_{\text{água líquida}} \times \dot{m}_{\text{água}} \quad (\text{Eq. 7.1})$$

em que,

- ✓ ΔT é a diferença entre a temperatura de saída da água e a temperatura de entrada da água na caldeira;
- ✓ $Cp_{\text{água líquida}, 70^{\circ}\text{C}} = 4,191 \text{ (kJ/kg} \cdot \text{K)}$;
- ✓ $\dot{m}_{\text{água}}$ é o caudal volumétrico de água a aquecer num intervalo de tempo.

Foi utilizado o software de cálculo das bombas WILO, para estimar o caudal das bombas instaladas na rede de distribuição de água, (Anexo I). Com base na potência, velocidade e características elétricas dos motores associados às bombas, estimou-se que o caudal de água de uma bomba são $11,3 \text{ (m}^3/\text{h)}$, pelo que, as 8 bombas do sistema fazem circular cerca de $90,4 \text{ (m}^3/\text{h)}$, à temperatura de $82,5^{\circ}\text{C}$ e a uma pressão de 3 bar.

Da Figura 6.4 mediu-se um período do funcionamento dos alimentadores de biomassa, ou seja, o tempo entre duas paragens consecutivas dos motores do sistema, pelo que, $\Delta t = 780 \text{ (s)}$.

Então, após a troca térmica entre a água e o ar ambiente dos pavilhões e, sabendo que na chegada da água à caldeira, esta vem cerca de 20°C mais fria, obtém-se que:

$$P = 2.105 \text{ kW}_{th}$$

Este valor significa que a caldeira estava a funcionar a 90,5% da sua potência nominal (2.325 kW_{th}).

7.1.3 Energia envolvida no processo

Para melhor se perceber quais as quantidades de energia envolvidas no balanço energético desenvolvido (Tabela 7.1), em termos específicos, isto é, por unidade de biomassa alimentada, foram calculados os resultados em termos de energia por unidade de tempo (potência). Para o efeito, foi necessário determinar o caudal de biomassa queimado na fornalha.

Sabendo que a potência nominal da caldeira é de 2.325 kW_{th} , e que a energia útil obtida é $13.378,86 \text{ kJ/kg}_{biomassa,bs}$, tem-se que:

$$\dot{Q}_{biomassa} = \frac{2.325}{13.378,86} \times 3600 = 625 \text{ (kg}_{biomassa}/h)$$

Na Figura 7.1 estão representadas as quantidades de energia por unidade de tempo (potência) em $\left(\frac{MJ}{s}\right)$, associadas a diferentes fluxos materiais do processo. A única fonte de energia que entra no processo, associado à biomassa, não corresponde ao valor total de energia perdida e energia útil produzida pelo mesmo. No entanto, é necessário considerar a energia gasta na vaporização da água presente na biomassa. Assim, a energia total dos reagentes é de $2,84 \text{ MJ/s}$, valor que corresponde à soma da energia perdida e útil do sistema.

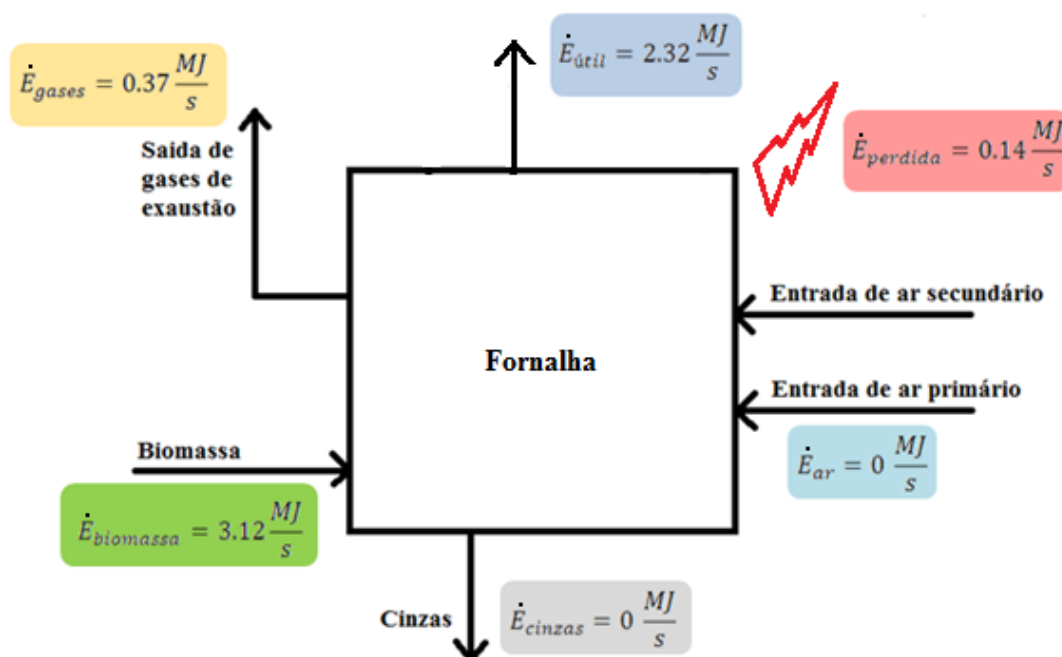


Figura 7.1 - Quantidades de energia envolvidas no processo.

7.1.4 Determinação dos caudais de ar envolvidos no processo

Como termo de comparação com os valores de referência dos caudais de ar e combustível associados ao processo de uma caldeira *Ventil*, com a potência da caldeira em estudo, na Tabela 7.2 são apresentados os caudais de ar e de gases de exaustão, referentes à queima de biomassa com 40% de humidade (base tal e qual), com 50% de excesso de ar.

Tabela 7.2 - Valores de típicos do desempenho de uma caldeira *Ventil* de 2325 kW_{th}.

$z = 1.5$	Ar de combustão ($T = 25^{\circ}\text{C}; P = 101325 \text{ Pa}$)			Gases de exaustão	Caudal de combustível (btq)	Eficiência térmica
	Temperatura de saída	TOTAL	Primário	Secundário		
	(°C)	(m³/h)	(m³/h)	(m³/h)	(kg/h)	(%)
	25	7.065,5	2.826,0	4.239,5	1.020,5	82,6
	150	-	-	-	-	-
				8.060,7		
				11.440,5		

Nos cálculos realizados, considerou-se que cada componente gasoso (no ar e nos gases de combustão) tem o comportamento de um gás ideal, tal que:

$$PV = nRT \quad (\text{Eq. 7.2})$$

Considerando que o ar atmosférico seco tem 21% de O_2 , o número de moles de ar de combustão necessário por kg de biomassa a queimar é:

$$n = \frac{W_a}{Y_{O_2A}} = 0,4897 \quad (\text{kmol}_{ar}/\text{kg}_{biomassa,bs})$$

Assim, aplicando a (Eq. 7.2) para $T^o = 25^{\circ}\text{C}$, $P = 101325 \text{ Pa}$ e $R = 8,314 \text{ (J/kg.mol)}$, obtém-se o volume de 11,98 ($\text{m}^3\text{ar}/\text{kg}_{biomassa,bs}$).

Sabendo o caudal de combustível que entra na fornalha numa hora, pode obter-se o caudal de ar total que é necessário ser introduzido na fornalha, que é igual a:

$$\dot{q}_{ar \text{ combustão}} = 7.489,75 \text{ (m}^3\text{ar/h)}$$

O volume dos gases de exaustão pode ser obtido a partir do número de moles dos gases húmidos produzidos por cada kg de biomassa queimado. Assim, pela (Eq. 7.2) sabendo que a temperatura de saída dos gases é 150°C , obtém-se o volume de 19,27 ($\text{m}^3\text{gases}/\text{kg}_{biomassa,bs}$). Assim o caudal de gases de exaustão é:

$$\dot{q}_{gases} = 12.053,64 \quad (m^3 ar/h)$$

Realizando o mesmo cálculo para $T^o = 25\text{ }^{\circ}C$ e $P = 101325\text{ Pa}$, obtém-se o seguinte valor para o caudal dos gases de exaustão:

$$\dot{q}_{gases,25\text{ }^{\circ}C} = 8.491,7 \quad (m^3 ar/h)$$

Trocando a base de cálculo do caudal de biomassa de base seca para base tal e qual obtém-se:

$$\dot{q}_{biomassa,btq} = \frac{\dot{q}_{biomassa,bs}}{(1 - w_{WH})} = 1.042 \quad (kg_{biomassa,btq}/h)$$

Na Tabela 7.3 estão resumidos todos os cálculos efetuados para os caudais de ar, gases de exaustão e combustível associados à operação da caldeira em estudo, nas mesmas condições de excesso de ar, temperatura e pressão considerados para os valores típicos apresentados anteriormente. Comparando os resultados obtidos com os valores de referência da Tabela 7.2, os caudais determinados estão coerentes e relativamente próximos a esses valores.

Tabela 7.3 - Valores obtidos do desempenho da caldeira em estudo.

$z = 1.5$	Ar de combustão ($T = 25^{\circ}C; P = 101325 Pa$)			Gases de exaustão	Caudal de combustível (btq)	Eficiência térmica
Temperatura de saída	TOTAL	Primário	Secundário			
($^{\circ}C$)	(m^3/h)	(m^3/h)	(m^3/h)	(m^3/h)	(kg/h)	(%)
25	7.489,75	-	-	8.491,7	1.042	81,99
150	-	-	-	12.053,64	-	-

7.2 Análise energética dos motores em estudo

Como foi referido no Capítulo 6, através do registo de dados efetuado pelo analisador de energia ‘Veja 76’, foi possível apresentar uma caracterização dos consumos relativos aos motores elétricos associados ao processo de produção de energia térmica.

Além de terem sido calculados os consumos de energia elétrica de cada motor, foram calculados os seus rendimentos (η), potencia mecânica e fator de carga. O rendimento foi obtido a partir da (Eq. 5.19), o fator de carga pela (Eq. 5.21), enquanto

que a potência mecânica foi obtida pela multiplicação da potência média com o rendimento. Estes valores podem ser observados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Rendimento, Potência mecânica e Carga dos motores em análise.

Motor	η (%)	$P_{média}$ [kW]	$P_{mecânica}$ [kW]	Fator de Carga (%)
Hidráulico	88,87	3,18	2,83	70,64
Sem-fim transporte	88,45	1,82	1,61	73,20
Sem-fim alimentação	84,57	3,18	2,69	122,20
Ventilador insuflação I	86,08	2,11	1,82	45,43
Ventilador insuflação II	81,61	1,59	1,30	86,73
Ventilador extração	54,50	1,11	0,60	5,48
Bomba	88,34	2,18	1,93	87,78

Numa primeira análise aos valores do FC dos motores, salta à vista que o motor do sem-fim de alimentação e do ventilador de insuflação I estão a atuar acima e abaixo, correspondentemente, da carga ótima. O motor do ventilador de extração parece estar igualmente mal dimensionado, enquanto que os restantes motores parecem funcionar bem dimensionados, para a função que desempenham.

Para caracterizar os consumos elétricos anuais, representantes do funcionamento dos motores da caldeira, é necessário fazer uma caracterização ao seu regime de funcionamento.

7.2.1 Análise energética e económica

Pela Tabela 7.5, observa-se que o motor do sistema hidráulico apresenta um consumo de 9.538,19 kWh num ano. Este motor encontra-se bem dimensionado, pelo que, nenhuma troca de motor seria uma medida vantajosa na perspetiva de se obter um ganho energético e uma consequente redução na fatura elétrica. Na troca por um motor IE2, de 3kW, o consumo seria maior, pois a diminuição da potência do motor resulta também num decréscimo do seu rendimento. Mesmo aumentando a classe de eficiência para um motor IE3, de 3kW e 4kW, não se observam ganhos significativos, sendo que no primeiro o consumo é ainda maior. Este facto deve-se ao elevado rendimento calculado do motor instalado.

Tabela 7.5 – Análise ao motor do sistema hidráulico.

Motor	Hidráulico IE2 - 4kW		
Eficiência média (%)	88,87		
Carga média (%)	70,60		
Consumo anual [kWh]	9.538,19		
Novo motor	IE2 - 3kW	IE3 - 3kW	IE3 - 4kW
Eficiência (%)	85,60	88,00	89,10
Consumo anual [kWh]	9.902,46	9.632,39	9.513,47
Diferença [kWh]	+ 364,27	+ 94,20	– 24,72
Poupança anual(€)			3,08

A partir da Tabela 7.6, verifica-se que o motor do sem-fim de transporte consome cerca de 5.461,88 kWh por ano. Como no caso anterior, este motor encontra-se igualmente bem dimensionado. Portanto, podia ser equacionada apenas a sua substituição para um motor de classe de eficiência IE3 com a mesma potência. No entanto, mais uma vez graças à proximidade entre rendimentos dos dois motores, não se justifica a troca por um motor de classe superior.

Tabela 7.6 - Análise ao motor do sem-fim de transporte.

Motor	Transporte IE2 - 2,2kW
Eficiência média (%)	88,50
Carga média (%)	73,20
Consumo anual [kWh]	5.461,88
Novo motor	IE3 - 2,2kW
Eficiência (%)	87,00
Consumo anual [kWh]	5.553,03
Diferença [kWh]	+ 91,15
Poupança anual(€)	–

O terceiro motor em análise com 2,2 kW de potência, e classe IE1, está associado ao sem-fim de alimentação, Tabela 7.7, e apresenta-se como o primeiro caso de estudo de interesse. Este motor encontra-se claramente em sobrecarga, estando a consumir mais energia do que seria o ideal. Também, o sobreaquecimento a que o motor está sujeito reduz significativamente o seu tempo útil de vida. Neste caso, independentemente da classe de eficiência, é proposta a troca para um motor com potência de 3kW. No entanto, como a eficiência dos motores IE3 é maior, perspetivam-se ganhos energéticos também maiores, estimando-se uma poupança de 38,66 € por ano.

Segundo informações obtidas à empresa de motores WEG, o motor de classe de eficiência *IE3*, de 3kW, terá um custo de 227,96 €, pelo que, o seu payback seria de 5,9 anos. Embora não seja um período de retorno atrativo, é essencial a troca pelo motor em sobrecarga.

Tabela 7.7 - Análise ao motor do sem-fim de alimentação.

Motor	Alimentação IE1 - 2,2kW	
Eficiência média (%)	0,846	
Carga média (%)	122,2	
Consumo anual [kWh]	9.536,55	
Novo motor	IE2 - 3kW	IE3 - 3kW
Eficiência (%)	85,6	88,00
Consumo anual [kWh]	9.421,73	9.164,78
Diferença [kWh]	– 114,81	– 371,77
Poupança anual(€)	11,94	38,66
Payback (anos)		5,9

O motor em análise na Tabela 7.8 está claramente sobredimensionado para a função que desempenha. A carga a que este motor funciona é apenas de 45,43%, pelo que será também alvo de uma possível troca. Neste caso, deve baixar-se a potência do motor de 4kW para os 2,2kW ou para os 3kW, ambos de classe de eficiência *IE3*. Esta redução da potência resultaria num aumento do fator de carga do motor para os 82,60% e 60,57% correspondentemente. No entanto, os ganhos energéticos não são relevantes devido ao elevado valor do rendimento calculado do motor instalado no sistema, em relação ao rendimento teórico dos motores que o poderiam substituir.

Tabela 7.8 - Análise ao motor do ventilador de insuflação I

Motor	Insuflação de ar primário IE2 - 4kW			
Eficiência média (%)	86,1			
Carga média (%)	45,43			
Consumo anual [kWh]	6.332,85			
Novo motor	IE2 - 2,2kW	IE3 - 2,2kW	IE3 - 3kW	IE3 - 4kW
Eficiência (%)	83,60	86,30	87,30	88,10
Consumo anual [kWh]	6.520,72	6.316,71	6.244,36	6.187,65
Diferença [kWh]	+ 187,87	– 16,13	– 88,49	– 145,19
Poupança anual (€)		1,68	9,20	15,10

O motor do ventilador de insuflação de ar secundário, Tabela 7.9, apresenta um dimensionamento correto. Este motor consome cerca de 4.782,10 kWh por ano, sendo este valor passível de poucas medidas de redução. A troca para um motor da mesma potência, mas de classe IE3, resultaria numa poupança pouco significativa, não excedendo dos 20€ anuais. Sendo que um motor de classe de eficiência IE3, de 1,5kW, custa cerca de 139€, o seu payback ultrapassa os 5 anos.

Tabela 7.9 - Análise ao motor do ventilador de insuflação II.

Motor	Insuflação de ar secundário IE2 - 1,5kW
Eficiência média (%)	81,61
Carga média (%)	86,7
Consumo anual [kWh]	4.782,10
Novo motor	IE3 - 1,5kW
Eficiência (%)	85
Consumo anual [kWh]	4.591,52
Diferença [kWh]	190,58
Poupança (€)	19,82
Payback (anos)	7,0

Quanto ao motor associado à bomba, este é o único exemplo com classe de eficiência IE3. Assim, como o seu dimensionamento está adequado à função que desempenha, não existe qualquer sugestão de troca para otimização de consumo, Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Análise do motor da bomba.

Motor	Bomba IE3 - 2,2kW
Eficiência média (%)	88,34
Carga média (%)	87,78
Consumo anual [kWh]	6.558,3

Como os motores associados às bombas do sistema de transporte de energia térmica tinham todas a mesma potência nominal, o consumo de energia elétrica será cerca de 8 vezes o consumo associado apenas à bomba em estudo.

Por último, numa primeira análise aos resultados obtidos para o motor do ventilador de exaustão, este mostra-se claramente sobredimensionado. Este motor, de potência nominal 11 kW está apenas a absorver uma potência de 1,11 kW, e por isso apresentar um fator de carga e um rendimento muito baixos.

No entanto, este motor funciona de acordo com a necessidade de extração dos gases de exaustão, podendo registar valores de potência absorvida bastante maiores consoante o aumento do caudal a extrair. Mesmo assim, a troca por um motor com potência menor deverá ser equacionada. Por exemplo, a substituição por um motor de $3kW$ iria resultar numa poupança significativa de energia, Tabela 7.11. Sabendo que o preço do novo motor seria de 210€, o período de retorno seria de apenas 1,62 anos.

Durante a medição de dados, e de acordo com o caudal de extração de gases, o variador de velocidade associado ao motor em análise marcava uma frequência de alimentação de $32,5\text{ Hz}$. Uma vez que a alteração da frequência de alimentação de 50 Hz para os $32,5\text{ Hz}$ reduz a velocidade do motor, pela (Eq. 5.28), sabe-se que ainda assim houve cerca de 70% de poupança de energia.

Tabela 7.11 - Análise ao motor do ventilador de extração.

Motor	Ventilador de extração de ar IE2 - 11kW
Eficiência média (%)	54,5
Carga média (%)	5,48
Consumo anual [kWh]	3.315,85
Novo motor	IE3 - 3kW
Eficiência (%)	87,3
Consumo anual [kWh]	2.069,75
Diferença [kWh]	1.246,11
Poupança (€)	129,60
Payback (anos)	1,62

Portanto, se for contabilizado o consumo total de energia elétrica referente a todos os motores associados à fornalha obtém-se o resultado apresentado na Figura 7.2. Como o sistema de distribuição de água quente produzida na caldeira funciona de forma independente à operação da fornalha, os consumos elétricos dessas bombas de água não foram contabilizados na análise realizada.

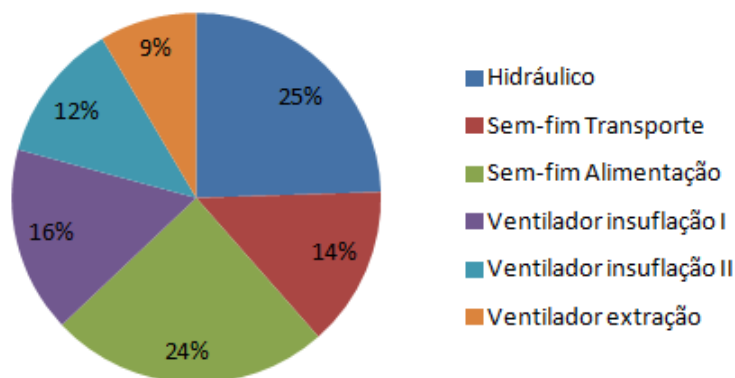


Figura 7.2 - Percentagem de consumo por cada motor.

Os motores associados ao sistema hidráulico e ao sem-fim de alimentação consomem cerca de 50% de energia do total dos motores considerados. Na Tabela 7.12 está um sumário relativo aos consumos desses motores, às potenciais poupanças e ao payback do investimento realizado.

Tabela 7.12 - Balanço da análise energética realizada aos motores.

Motor	Potência (kW)	Consumo atual (kWh)	Consumo do novo motor (kWh)	Investimento (€)
Hidráulico	4	9.538,19	—	—
Sem-fim Transporte	2,2	5.461,88	—	—
Sem-fim Alimentação	2,2	9.536,55	9.164,78	227,96
Ventilador insuflação I	4	6.332,85	—	—
Ventilador insuflação II	1,5	4.782,1	4.591,52	138,92
Ventilador extração	11	3.315,85	2.069,75	210
Total	—	38.967,42	37.158,97	576,88

Ao fim de 1 ano, o consumo realizado pelos motores do sistema é de 38.967,42 kWh. Uma vez que o preço por kWh é 0,104 €, a empresa terá um total a pagar de 4.052,6 € de fatura elétrica nesse ano. No caso de se efetuarem as trocas propostas, a fatura elétrica desce para os 3.864,5 €. Graças a uma redução de 4,65% no consumo de energia elétrica, podem ser poupados 188,1 €/ano. Esta redução permite obter um payback do investimento feito em 3,1 anos.

Juntando os 52.466,4 kWh consumidos pelas 8 bombas do sistema, a empresa teria a pagar sem nenhuma medida tomada, cerca de 9.509,1 € ao final de um ano.

7.3 Relação entre o consumo de energia elétrica e de biomassa

Segundo o (*Despacho nº 17313/2008*), considerem-se as seguintes conversões entre formas de energia:

- ✓ Para os combustíveis sólidos primários, a conversão termodinâmica de MJ para tep é dada por: $41.868 MJ = 1 tep$;
- ✓ Para a energia elétrica, a conversão de kWh para tep é dada por: $1 kWh = 215 \times 10^{-6} tep$.

Desta forma, para estabelecer uma base de comparação entre a energia elétrica consumida pela fornalha e a energia primária associada à biomassa utilizada pela mesma fornalha, converteram-se ambas as formas de energia em tep .

Assim, tendo sido obtido um consumo de energia elétrica de $91.433,82 kWh$ num ano, o valor correspondente em tep é de $19,66 tep$.

No que diz respeito à biomassa, sabendo que são consumidos $625 (kg_{biomassa,bs}/h)$, ao fim de 1 ano serão consumidos $1.875.000 (kg_{biomassa,bs}/ano)$. Sendo

$$E_{biomassa,bs} = m_{biomassa,bs} \times PCI_R$$

obtém-se que $E_{biomassa,bs} = 33,65 \times 10^6 (kJ/ano)$. Convertendo este valor para tep , obtém-se cerca de $803,71 tep$.

Quanto ao gasto na fatura energética de eletricidade e da biomassa, verificou-se que pelo funcionamento dos motores elétricos se gastavam cerca de $9.509 €$ num ano. Sendo o preço por tonelada de biomassa (estilha de pinheiro) cerca de $50 €$, o custo total ao longo do mesmo ano será de $93.750 €$. Assim, a empresa para manter a caldeira a funcionar de acordo com o período previsto teria um encargo financeiro de $103.259 €$.

7.4 Alteração do sem-fim para tapete

Na visita realizada até ao sistema em estudo, foi registado um possível problema no sem-fim de transporte do mesmo sistema. Devido à inclinação com que este se apresentava, mas também devido ao espaçamento existente entre o sem-fim e a caixa do mesmo, o material tinha tendência a escapar-se por esse intervalo. Este facto pode ser verificado na imagem da esquerda da Figura 7.3.

Portanto, de forma a tentar otimizar o transporte do combustível para o sem-fim de alimentação, dá-se a sugestão de troca por outro tipo de transportador para casos com inclinações deste tipo. A substituição do tipo de transporte por um tapete, poderia melhorar o desempenho do sistema (imagem da direita da Figura 7.3).



Figura 7.3 - Sistema de transporte atual e proposta de troca para tapete.

8 Conclusão

A atual crise financeira instalada um pouco por todo o mundo, tem inflacionado os preços de bens e serviços na maioria dos mercados. O mercado energético não foge à regra, em que os preços da eletricidade e principalmente dos combustíveis líquidos tendem a subir cada vez mais, devido a fatores socioeconómicos e da possível escassez das fontes de energia não renovável.

Assim, é de extrema importância que sejam desenvolvidas tecnologias mais eficientes, que permitam reduzir o consumo de energia primária, através do aumento de eficiência quer de equipamentos elétricos, ou qualquer outro equipamento consumidor de energia.

As fornalhas e caldeiras *Ventil* a biomassa são uma alternativa adequada a fornalhas e caldeiras consumidoras de qualquer fonte de energia fóssil (como o gás, o carvão e o petróleo), ou qualquer outro sistema com a função de produzir calor a ser utilizado a nível industrial, de serviços ou comunitário. A utilização da biomassa como fonte energética pode ser uma vantagem, pois para além de ser um recurso energético renovável, a sua combustão resulta numa baixa emissão de poluentes.

Ainda assim, a viabilidade de uma caldeira deste tipo está condicionada pelo calor produzido a partir da combustão de biomassa, e é condicionada pelas características da matéria prima, pela sua eficiência, e custos finais da tecnologia para a conversão energética.

Este trabalho teve como principais objetivos, avaliar os consumos energéticos (em particular ao consumo de energia elétrica dos equipamentos auxiliares) a uma caldeira *Ventil*, instalada numa empresa do ramo agroalimentar, e determinar o seu rendimento. Pretendeu-se ainda apresentar medidas de eficiência energética aplicadas ao mesmo sistema.

Pelo balanço energético realizado à caldeira, foi possível realizar uma avaliação quantitativa da energia associada aos reagentes (biomassa e ar de combustão) que intervêm no processo, aos produtos formados, à energia perdida pelas paredes e gases de exaustão e, como a mais importante, a energia útil que se retira do processo. A partir

da energia dos reagentes e da energia útil, estimou-se a eficiência da caldeira, a qual ronda os 82%, valor que está na gama típica dos sistemas de produção de energia térmica, por tecnologias de combustão de biomassa.

Foram também calculados os caudais de ar e biomassa necessários à combustão na fornalha da caldeira, bem como dos gases de exaustão. Estes valores estão de acordo com os valores de referência para uma caldeira da mesma potência.

Quanto aos motores elétricos, foram detetados 3 casos de um eventual mau dimensionamento.

Destes 3 motores, o motor de $2,2kW$ associado ao sem-fim de alimentação, operava com uma carga acima da qual foi projetado. Desta forma foi sugerida a substituição para um motor de classe *IE3* de $3kW$.

O motor do ventilador de insuflação I operava a uma carga de 45,43%, pelo que a sua substituição por um motor com potência menor poderia resultar num ganho energético. No entanto, como baixando a potência de um motor, baixa igualmente o seu rendimento, a troca deste motor não seria rentável.

O último motor mal dimensionado é o motor associado ao ventilador de exaustão. Então foi proposta a substituição do motor de classe *IE2* de $11kW$ para um de classe *IE3* de $3kW$.

O motor do ventilador de insuflação II, apesar de estar bem dimensionado, seria viável efetuar a troca por um motor da mesma potência mas de classe *IE3*. O aumento no rendimento do motor iria baixar o consumo de energia.

Os rendimentos calculados para os motores instalados no sistema, estão sobrevalorizados em relação a alguns dos seus rendimentos teóricos. Este facto pode inviabilizar a possível troca por equipamentos de classe de eficiência superior.

Ainda assim, o um investimento de 577€ na troca de 3 motores, resulta numa poupança de 188,1€ por ano, baixando a fatura energética de 9.509,1€ para 9.321€. Esta poupança pagaria o investimento feito em 3.1 anos.

Estimou-se que num ano seriam consumidos 1875 toneladas de biomassa (em base seca) pelo sistema, o que corresponde a 803,71 *tep*. Quanto à fatura energética total do sistema (biomassa e eletricidade), estimou-se um custo anual de 103.259€.

Na visita realizada, observou-se que praticamente todos os motores eram de marcas diferentes. Portanto, para além das medidas enunciadas, seria útil adotar a mesma marca para todos os motores do sistema em estudo, assim como nos projetos para venda futura. Esta ação poderia resultar numa redução do preço na compra dos motores, assim como a manutenção e o fornecimento de peças poderia vir a ser melhorada.

8.1 Trabalhos futuros

No seguimento deste trabalho, seria importante realizar uma monitorização de outras variáveis de operação da fornalha e da caldeira, como por exemplo os caudais de ar, de biomassa, de gases de combustão, da temperatura e pressão dos circuitos de gases, de água, entre outros.

A base de dados obtida pelo funcionamento dos motores elétricos deveria ser alargada a outras instalações do género da monitorizada neste trabalho.

Obter o regime de funcionamento dos motores elétricos num espaço de tempo mais alargado, podendo resultar numa análise mais precisa, e de forma a incluir diferentes regimes do processo.

Existe também a possibilidade de aplicar variadores de velocidade em todos os motores do sistema, e verificar a possível redução do consumo de energia elétrica. Ainda assim seria interessante observar o comportamento destes motores em vários regimes de carga da fornalha/caldeira.

9 Bibliografia

ABB, *Technical note IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors*, 2011.

ADENE, *Medidas de eficiência energética aplicáveis à indústria portuguesa: um enquadramento tecnológico sucinto*, 2010.

Albuquerque, R.O., *Análise de Circuitos em Corrente Alternada*, Erica editora Ltda, São Paulo, 1993.

Almeida, A. T. De, Member, S., Ferreira, F. J. T. E., & Both, D., 2005. *Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives With Electric Motor Systems*, 41(1), 188–199.

Almeida, J., Tese de mestrado: *Projeto de sistema à escala piloto para conversão energética de biomassa*, 2010.

Almeida, J. & Tavares, C., *Caldeiras Ventil: equipamentos competitivos para a produção de energia térmica*, Renováveismagazine, pp 70-71, 2013.

Alves, F.M., *ABC dos circuitos elétricos em corrente alternada*, 1999. Disponível: http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/PubDid/ABC_CECA.PDF. [Acedido 21-3-2014]

APA, *Relatório de Estado do Ambiente 2013*, Agência Portuguesa do Ambiente, Portugal, Outubro 2013.

Bernardo, J.P., *Política Energética Nacional – desafios para 2020*, DGEG, 2013.

Bilgen, S., 2014. *Structure and environmental impact of global energy consumption*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, pp.890–902. Disponível: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114004560> [Accessed July 30, 2014].

BP, *BP Statistical Review of World Energy*. British Petroleum, June 2014.

Chang, R., *Química*, 5ª ed., Editora McGraw-Hill de Portugal, 1994.

Chirakalwasan, R., *Motor Load and Efficiency*, Ashare Journal, Bangkok, 2007.

CCE - Comissão das Comunidades Europeias, Livro Verde, *Estratégia europeia para uma energia sustentável*, competitiva e segura, Bruxelas, 2006.

CEMEP, *Electric Motors and Variable Speed Drives*, Frankfurt, 2011.

CPN - Comissão Permanente de Negociação, *Eletricidade Básica*, São Paulo, 2005. Disponível: <https://pt.scribd.com/doc/215465960/Eletricidade-Basica-09-08-2005-atualizado> [Acedido 21-3-2014].

CUE, Concelho da União Europeia, *Plano de ação global no domínio da energia para o período de 2007-2009*, 2007. Disponível: <http://register.consilium.europa.eu/doc/srv?l=PT&f=ST%207224%202007%20REV%201> [Acedido 4-10-2014].

EEA Report N8, *Energy and environment in the European Union*, Copenhagen: European Environment Agency, 2006.

Engelmann, R., Middendorf, W., *Handbook of Electric Motors*, New York: M. Dekker, 1995.

Erol, M., Haykiri-Acma, H. & Küçükbayrak, S., 2010. *Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data*. Renewable Energy, 35(1), pp.170–173. Disponível: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148109002298> [Acedido 21-10-2014].

Ferreira, F.J.T.E. & de Almeida, A.T., 2012. *Induction motor downsizing as a low-cost strategy to save energy*. Journal of Cleaner Production, pp.117–131.

FC - Futur-Compet, *Casos de utilização de energias renováveis*, 2010.

Grundfos, *Grundfos motor book*, Bjerringbro, 2004.

IEA, *World Energy Outlook*, Paris: International Energy Agency, 2012.

IEA, *World Energy Outlook*, Paris: International Energy Agency, 2013a. Disponível: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2013/WEO2013Ch01ScopeAndMethodology.pdf>.

IEA, *World Energy Outlook*, Executive Summary, Paris: International Energy Agency, 2013b.

Lousada, J.L., Telmo, C., Schmitz, R., 2010. Apresentação: *Avaliação das Propriedades Termoquímicas de Várias Madeiras Nacionais, Exóticas e Matos*., Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Manual de Instruções, Manutenção e Operação dos sistemas *Ventil*.

Matias, J., *Máquinas eléctricas de corrente alternada*, Didáctica Editora, Lisboa, 1994.

Matos, A., Apontamentos da disciplina de Tratamento e Gestão de Resíduos Sólidos, *Capítulo 5- Valorização e eliminação termoquímica de resíduos*, 2012.

Matsuo, Y., Yanagisawa, A. & Yamashita, Y., 2013. *A global energy outlook to 2035 with strategic considerations for Asia and Middle East energy supply and demand interdependencies*. Energy Strategy Reviews, pp.79–91. Disponível: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211467X13000527> [Acedido: 22-9-2014].

Paiva, E., *Máquinas elétricas: Bases de corrente elétrica alternada (sinusoidal)*. Disponível: <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/eduardop/MqE/Bases%20CA.pdf> [Acedido: 14-3-2014].

Rodrigues, J., *Electrotecnia: corrente alternada*, Didáctica Editora, Lisboa, 1991.

Saidur, R., 2010. *A review on electrical motors energy use and energy savings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(3), pp.877–898. Disponível: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109002494> [Acedido: 15-7-2014].

Saidur, R. et al., 2011. *A review on biomass as a fuel for boilers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp.2262–2289. Disponível: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111000578> [Acedido 19-7-2014].

Saidur, R. et al., 2012. *Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), pp.543–550. Disponível: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111004308> [Acedido 2-10-2014].

Tarelho, L., Apontamentos da disciplina de Conversão de Energias Renováveis, *Caracterização da Biomassa*, 2013.

UE, *Sínteses da Legislação da EU*, 2014. [Acedido: 3-10-2014] http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/127062_pt.htm.

US Department of Energy, *Determining electric motor load and efficiency*. Disponível: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/10097517.pdf [Acedido: 26-12-2014].

United Nations, *Kyoto protocol to the united nations framework, Convention on Climate Change*, 1998.

Vassilev, S., et al., 2010. *An overview of the chemical composition of biomass*. Fuel, pp.913-933.

van Loo, S., Koppejan, J., 2008. *Handbook of biomass combustion and co-firing*.

WEG Equipamentos Elétricos S/A – Motores, *Motores elétricos: linhas de produtos, características, especificações, instalações, manutenções*, 2005.

WEG - *Green Energy Efficiency*, 2014 Disponível: <http://www.weg.net/green/uk/global-efficiency-regulations.html> [Acedido: 10-3-2014].

Sites da internet

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia. Disponível: <http://www.dgeg.pt/> [Acedido: 23-9-2014].

Portal das Energias Renováveis, Biomassa. Disponível: http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=5&ID_area=2&ID_sub_area=3 [Acedido: 20-9-2014].

Legislação nacional e normas

DR – Diário da República, Ministério da Economia e da Inovação, *Decreto-Lei n.º 71/2008*, 2008.

DR – Diário da República, 2ª série – n.º 122, *Despacho n.º 17313/2008*, 2008.

DR – Diário da República, *Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010*, 2010.

DR – Diário da República, *Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013*, 2013.

Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, Jornal Oficial da União Europeia, L140/16, 23 de Abril de 2009.

